



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH  
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TREBALL FI DE GRAU

**Grau en Enginyeria de l'Energia**

**TECNOLOGIES DE MICROGENERACIÓ COMBINADA DE  
CALOR, FRED I ELECTRICITAT PER EDIFICIS**



**Memòria**

<b>Autor:</b>	Roger Calvera Sánchez
<b>Director:</b>	Maria Elena Martin Cañadas
<b>Convocatòria:</b>	Juny 2018



## Resum

El present document correspon a un Treball de Fi de Grau d'Enginyeria de l'Energia sobre tecnologies de microgeneració combinada de calor, fred i electricitat per edificis.

La microtrigeneració és un procés pel qual es genera calor, fred i electricitat a petita escala i és el concepte entorn al qual s'estructura el treball.

Al principi del treball es presenten els conceptes de cogeneració i trigeneració així com les diferents tecnologies utilitzades per dur a terme aquests processos. Més endavant, es detalla amb precisió la metodologia que cal seguir en el moment de dissenyar un sistema basat en aquestes tecnologies i es posa en pràctica en el moment de dissenyar un sistema de microtrigeneració adequat a les necessitats d'una vivenda unifamiliar situada en una localitat catalana. Per últim, s'avalua l'impacte del projecte i es realitza un estudi per determinar la seva viabilitat econòmica.

El sistema s'ha dissenyat a partir d'un mètode iteratiu que es retroalimenta a mesura que s'avança en les etapes de disseny per tal de millorar la seva precisió i contemplar el major nombre possible d'escenaris en els quals operarà el sistema.

## Resumen

El presente documento corresponde a un Trabajo de Final de Grado de Ingeniería de la Energía sobre tecnologías de microgeneración combinada de calor, frío y electricidad para edificios.

La microtrigeneración es un proceso por el cual se genera calor, frío y electricidad a pequeña escala y es el concepto en torno al cual se estructura el trabajo.

Al principio del trabajo se presentan los conceptos de cogeneración y trigeneración además de las diferentes tecnologías utilizadas para llevar a cabo estos procesos. Más adelante, se detalla con precisión la metodología que hay que seguir para diseñar un sistema basado en estas tecnologías y se pone en práctica para diseñar un sistema de microtrigeneración adecuado a las necesidades de una vivienda unifamiliar situada en una localidad catalana. Por último, se evalúa el impacto del proyecto y se realiza un estudio para determinar su viabilidad económica.

El sistema se ha diseñado a partir de un método iterativo que se retroalimenta a medida que se va avanzando en las etapas de diseño para mejorar su precisión y contemplar el mayor número de escenarios posibles en los cuales operará el sistema.

## Abstract

This document corresponds to an Energy Engineering thesis on combined microgeneration technologies of heat, cold and electricity for buildings.

Microtrigeneration is a process by which heat, cold and electricity are generated on a small scale and is the concept around which the project is structured.

At the beginning of this work, the concepts of cogeneration and trigeneration are presented and also the different technologies used to carry out these processes. Later, the methodology to be followed to design a system based on these technologies is detailed and put into practice to design a microtrigeneration system suited to the needs of a single-family house located in a Catalan village. Finally, the impact of the project is evaluated and a study to determine its economic viability is done.

The system has been designed based on an iterative method that is fed back as the stages of design are completed to improve its accuracy and contemplate the largest possible number of scenarios in which the system will operate.



## Glossari

**CHP:** generació combinada de calor i electricitat

**SHP:** generació per separat de calor i electricitat

**CCHP:** generació combinada de calor, fred i electricitat (trigeneració)

**mCCHP:** microgeneració combinada de calor, fred i electricitat (microtrigeneració)

**CO<sub>2</sub>:** diòxid de carboni

**GHG:** gasos d'efecte hivernacle

**DER:** fonts d'energia distribuïdes

**RES:** fonts d'energia renovables

**MCC:** refrigerador per compressió mecànica

**TCC:** refrigerador per compressió tèrmica

**PV:** fotovoltaic

**ST:** solar tèrmic

**PV/T:** sistema híbrid fotovoltaic/tèrmic

**VRE:** energies renovables variables

**ACS:** aigua calenta sanitària

**RSU:** residus sòlids urbans

**HDD:** graus-dia de calefacció

**CDD:** graus-dia de refrigeració

**GFA:** àrea de la planta baixa

**TFA:** àrea total del sòl

# Índex

<b>RESUM</b>	<b>I</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>II</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>III</b>
<b>GLOSSARI</b>	<b>V</b>
<b>1. INTRODUCCIÓ</b>	<b>3</b>
1.1. Objectius del treball .....	3
1.2. Abast del treball .....	3
<b>2. CONCEPTES BÀSICS</b>	<b>5</b>
2.1. Introducció a la generació combinada.....	5
2.1.1. Indicadors de rendiment dels sistemes de cogeneració .....	6
2.2. Trigeneració .....	9
2.2.1. Conversió d'energia en trigeneració .....	10
2.2.2. Indicadors de rendiment en sistemes de trigeneració .....	15
2.2.3. Estalvi d'energia primària .....	15
<b>3. MICROSISTEMES COMBINATS</b>	<b>19</b>
3.1. Tecnologies de microcogeneració.....	19
3.1.1. Turbines de vapor .....	20
3.1.2. Microturbines de gas .....	22
3.1.3. Motors tèrmics de combustió interna .....	23
3.1.4. Motors Stirling.....	23
3.1.5. Cèl·lules de combustible .....	24
3.2. Comparació de les diferents tecnologies de cogeneració en sistemes mCHP .....	25
3.3. Sistemes mCCHP .....	28
3.3.1. Arquitectura dels sistemes mCCHP .....	28
3.3.2. Sistemes mCCHP amb refrigerador per compressió mecànica.....	30
3.3.3. Sistemes mCCHP amb refrigerador per compressió tèrmica.....	31
3.3.4. Modes d'operació de les unitats mCHP .....	32
<b>4. SISTEMES MCCHP BASATS EN ENERGIES RENOVABLES</b>	<b>38</b>
4.1. Energia primària en sistemes energètics en edificis .....	38
4.1.1. Sistemes de microcogeneració .....	38
4.2. Energia solar .....	38



4.2.1.	Principi de conversió de l'energia solar.....	39
4.2.2.	Rendiments en la conversió d'energia solar .....	40
4.2.3.	Emmagatzematge d'energia solar.....	40
4.3.	Biomassa .....	42
4.3.1.	Fonts i tecnologies de la biomassa .....	42
4.3.2.	Combustió de biofuel.....	43
4.4.	Unitats de cogeneració basades en motors Stirling .....	43
4.5.	Calderes .....	44
4.6.	Col·lectors solars tèrmics.....	45
4.6.1.	Rendiment dels col·lectors solars tèrmics.....	47
4.7.	Panells Fotovoltaics.....	47
<b>5.</b>	<b>DISSENY ESTRUCTURAL DE SISTEMES MCCHP-RES .....</b>	<b>49</b>
5.1.	Marc de treball conceptual .....	49
5.1.1.	Esquema conceptual del sistema .....	50
5.1.2.	Procediment.....	50
5.1.3.	Procés de disseny .....	52
5.2.	Pla de negoci del fabricant .....	53
5.3.	Presa de dades inicial .....	53
5.4.	Modelització estructural de sistemes .....	61
5.4.1.	Construcció del model general estructural.....	61
5.4.2.	Identificació dels models estructurals potencials.....	61
5.5.	Estimació del consum .....	62
5.6.	Estimació analítica del consum de calor i de fred .....	62
5.6.1.	Estimació analítica basada en el coeficient de transferència de calor de l'habitatge.....	64
5.6.2.	Estimació analítica basada en el coeficient d'aïllament tèrmic d'un edifici .....	69
5.7.	Estimació analítica del consum de calor per ACS.....	70
5.8.	Estimació analítica del consum energètic d'instal·lacions domèstiques.....	71
5.8.1.	Procediment basat en l'estimació del consum global.....	71
5.9.	Estimació sintètica basada en el certificat energètic.....	72
5.9.1.	Certificat energètic d'un edifici .....	72
5.9.2.	Estimació del consum específic .....	73
5.10.	Agregació del consum .....	74
5.10.1.	Agregació del consum per refrigeradors mecànics per compressió.....	74
5.10.2.	Agregació del consum per a refrigeradors tèrmics per compressió .....	75
5.11.	Estimació de la càrrega .....	75

5.11.1.	Càrrega i consum.....	75
5.11.2.	Sistema d'estimació de la càrrega.....	76
5.11.3.	Compartició de càrrega.....	76
5.12.	Avaluació i millora del rendiment dels models estructurals .....	76
5.12.1.	Indicadors per l'avaluació del rendiment a nivell del sistema .....	76
5.13.	Avaluació del rendiment dels models potencials estructurals .....	77
<b>6.</b>	<b>DISSENY FUNCIONAL DE SISTEMES MCCHP-RES .....</b>	<b>79</b>
6.1.	Modelització funcional de sistemes.....	79
6.1.1.	Dimensionament dels components del sistema.....	79
6.2.	Control i operació dels sistemes .....	99
6.2.1.	Modes d'operació de les unitats CHP .....	99
6.2.2.	Estratègia de control dels sistemes CCHP .....	100
6.3.	Anàlisi dinàmic del sistema.....	104
6.3.1.	Principis de la modelització i simulació numèrica .....	104
6.3.2.	Simulació dels règim dinàmics.....	104
6.3.3.	Conclusions.....	109
6.4.	Disseny del subsistema de control.....	109
<b>7.</b>	<b>CAS D'APLICACIÓ .....</b>	<b>111</b>
7.1.	Marc de treball conceptual .....	111
7.1.1.	Estudi de la normativa aplicable.....	111
7.1.2.	Anàlisi de les necessitats locals .....	112
7.2.	Pla de negoci del fabricant .....	112
7.3.	Presa de dades inicial .....	112
7.3.1.	Característiques de l'habitatge.....	113
7.3.2.	Necessitats i requeriments dels habitants .....	115
7.3.3.	Necessitats funcionals de l'habitatge.....	115
7.3.4.	Entorn energètic de l'habitatge.....	116
7.4.	Modelització estructural del sistema.....	119
7.5.	Estimació del consum .....	119
7.5.1.	Estimació de la calor i el fred que cal generar a l'habitatge.....	120
7.5.2.	Estimació analítica del consum de calor en la producció d'ACS .....	121
7.5.3.	Estimació analítica de la potència elèctrica global consumida per les instal·lacions domèstiques.....	122
7.5.4.	Determinació del consum específic .....	122
7.5.5.	Agregació del consum.....	123
7.6.	Estimació de càrrega .....	125

7.6.1. Compartició de càrrega.....	125
7.7. Avaluació i millora del rendiment del sistema .....	126
7.7.1. Indicadors de rendiment a nivell del sistema .....	126
7.7.2. Millora del rendiment .....	127
7.7.3. Avaluació del rendiment total i la relació d'energies renovables .....	130
7.8. Dimensionament dels components del sistema .....	132
7.8.1. Components del subsistema elèctric .....	132
7.8.2. Components del subsistema tèrmic.....	134
7.9. Correcció del sistema a partir del consum dels aparells .....	136
7.10. Operació i control del sistema.....	143
7.11. Anàlisi del sistema .....	143
7.12. Conclusions .....	146
<b>8. IMPACTE AMBIENTAL .....</b>	<b>148</b>
<b>ESTUDI ECONÒMIC .....</b>	<b>149</b>
<b>CONCLUSIONS .....</b>	<b>153</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>156</b>



# 1. Introducció

## 1.1. Objectius del treball

Els objectius principals del treball són l'estudi de les diferents tecnologies de microtrigeneració per ús residencial i la seva aplicació alhora de dissenyar un sistema capaç de cobrir per complet les necessitats energètiques d'una vivenda unifamiliar. Per al disseny d'aquest sistema es detallarà una metodologia concreta per al disseny de sistemes basats en tecnologies de trigeneració i s'implementarà per tal d'assolir la independència de la xarxa elèctrica d'un habitatge concret.

Es pretén dur a terme els objectius de la manera més respectuosa possible amb el medi ambient a partir d'un sistema eficient que aprofiti al màxim l'energia generada i que doni importància a les energies renovables.

A grans trets, el volum d'informació es distribuirà entre l'estudi de les tecnologies que fan possible la generació combinada, el mètode de disseny d'un sistema de trigeneració i el cas d'aplicació que anirà des de l'anàlisi de les necessitats de la vivenda a les solucions proposades per satisfer-les.

## 1.2. Abast del treball

En aquest projecte es detallarà el funcionament del sistema energètic dissenyat a més dels equips escollits per tal de materialitzar-lo. També s'explicaran els càlculs per tal de justificar les decisions que d'ells se'n derivin, s'avaluarà l'impacte que comportarà la implantació del sistema i es farà un estudi econòmic per tal de determinar la viabilitat de la inversió necessària.

## 2. Conceptes bàsics

### 2.1. Introducció a la generació combinada

La generació combinada o cogeneració és un sistema de producció d'energia mitjançant el qual s'obtenen simultàniament energia elèctrica o mecànica i energia tèrmica útil a partir d'una mateixa font d'energia primària.

Al produir aquestes formes d'energia a partir del mateix procés tecnològic, la cogeneració presenta un estalvi significatiu en les pèrdues d'energia produïdes en comparació amb la producció d'aquestes formes d'energia en processos separats. Aquest estalvi en les pèrdues energètiques es tradueix en una major eficiència que és el principal avantatge de la cogeneració.

Les plantes de producció amb cogeneració poden ser a gran escala; centralitzades a prop de grans ciutats o bé a petita o mitjana escala situades a prop dels centres de consum.

La generació d'energia elèctrica descentralitzada combinada amb subministrament de calor (CHP) és una tecnologia que permet augmentar l'eficiència i la seguretat del subministrament. Com a conseqüència d'aquesta alta eficiència s'estalvia combustible reduint així les emissions de CO<sub>2</sub>. Les instal·lacions respectuoses amb el medi ambient com les microturbines, instal·lacions fotoelèctriques, cèl·lules de combustible o microturbines de vent entre d'altres han guanyat popularitat i han suposat un augment en l'interès per la generació distribuïda, particularment la que es produeix a prop del lloc de consum. Aquest tipus d'instal·lacions impliquen dos conceptes importants: fonts d'energia distribuïdes (DER) i fonts d'energia renovables (RES).

En aquest projecte serà necessari aplicar aquestes tecnologies a edificis, per la qual cosa caldrà tindre en compte diferents conceptes al dissenyar el sistema de producció d'energia. En primer lloc serà necessari l'ús simultani de varies fonts d'energia integrades en el sistema tal com combustibles fòssils, energia solar, eòlica...

Caldrà situar les instal·lacions de cogeneració el més a prop possible del lloc de consum i dimensionar-les d'acord amb les necessitats dels habitatges per tal de poder satisfer la demanda necessària sense malbaratar recursos.

També és convenient dissenyar una xarxa intel·ligent a partir d'un sistema de mesura intel·ligent i un flux d'energia bidireccional en baixa tensió.

La generació distribuïda d'energia complementa a la generació centralitzada ja que serveix de suport quan es produeix un augment en l'energia demandada, redueix o evita la instal·lació d'elements de transport i localitza la generació d'energia on es necessita.

El sistema energètic avança cap a la descentralització. De totes formes, la generació centralitzada i la descentralitzada poden coexistir durant aquesta transició i aquesta convivència és més eficient gràcies a les smartgrids o xarxes intel·ligents. Aquest fenomen també dona lloc a l'aparició d'usuaris que produeixen i consumeixen la seva pròpia electricitat.

La generació combinada es presenta com la alternativa a la generació per separat davant de la necessitat de produir energia tèrmica i energia elèctrica

### 2.1.1. Indicadors de rendiment dels sistemes de cogeneració

Eficiència en la producció d'electricitat i calor per separat:

La calor es produeix a través d'una caldera de tal manera que l'energia primària del combustible (energia química) es transformi en energia tèrmica útil. Les calderes són l'aparell més convenient per a la producció de calor per a calefacció i per a l'escalfament d'aigua.

L'eficiència del procés pel qual es transforma l'energia d'un combustible en energia tèrmica ve donada per la primera llei de la termodinàmica com el quocient entre l'energia útil obtinguda i el contingut energètic del combustible utilitzat en kWh.

$$EFF_H = \frac{Q_H}{Q_F} \quad (\text{Eq. 1})$$

On:

$EFF_H$  és el rendiment del procés de transformació de l'energia del combustible en energia tèrmica

$Q_H$  és l'energia tèrmica útil

$Q_F$  és l'energia del combustible consumit

El valor de l'eficiència en aquest procés dependrà del combustible que es faci servir i del funcionament de la cambra de combustió. L'ús de gas natural fa que la caldera funcioni amb un rendiment al voltant del 85%, en canvi, el rendiment d'una caldera baixa fins entorn al 65% quan es fa servir biomassa com a combustible.

La generació d'energia elèctrica a partir d'un combustible comporta varies transformacions. L'energia primària del combustible (energia química) ha de ser transformada en energia tèrmica útil que serà transformada en energia mecànica per finalment ser transformada en energia elèctrica. L'eficiència del procés ve definida per la fórmula següent:

$$EFF_P = \frac{E}{Q_F} = \frac{Q_H W_M E}{Q_F Q_H W_M} \quad (\text{Eq. 2})$$

On:

$EFF_P$  és el rendiment del procés de transformació de l'energia del combustible en energia elèctrica

$E$  és l'energia elèctrica obtinguda

$W_M$  és l'energia mecànica

$Q_H$  és l'energia tèrmica útil

$Q_F$  és l'energia del combustible consumit

El valor de l'eficiència en aquest procés ronda el 33%.

En el cas de la producció de calor i electricitat per separat (SHP), el rendiment ve donat pel quocient entre la suma de l'energia elèctrica neta produïda (E) i l'energia tèrmica útil produïda ( $Q_H$ ) i la suma del combustible consumit per produir ambdues formes d'energia.

- Eficiència energètica en CHP

Quan es parla de la cogeneració en un sistema CHP, l'eficiència global del procés ( $EFF_{CHP}$ ) ve donada com el quocient entre la suma de l'energia elèctrica neta produïda (E) i l'energia tèrmica útil produïda ( $Q_H$ ) i el contingut energètic del combustible emprat en kWh.

$$EFF_{CHP} = \frac{E + Q_H}{Q_F} \quad (\text{Eq. 3})$$

On:

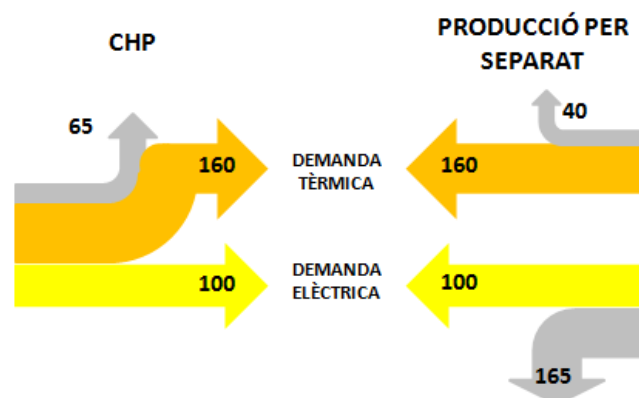
$EFF_{CHP}$  és el rendiment del procés de producció d'energia en un sistema CHP

E és l'energia elèctrica obtinguda

$Q_H$  és l'energia tèrmica útil obtinguda

$Q_F$  és l'energia del combustible utilitzat

Al comparar el rendiment dels sistemes CHP amb els sistemes SHP s'observa que és més elevat en el cas dels sistemes CHP ja que recuperen l'energia perduda i la transformen en energia útil. Per avaluar-lo es disposa de dos factors: el factor d'ús d'energia (FUE) i l'estalvi d'energia primària (PES).



**Figura 2.1:** Balanç energètic de la producció CHP en front de la producció SHP

Font: elaboració pròpia



La figura 2.1 permet comparar l'energia primària utilitzada per produir 160 unitats d'energia tèrmica i 100 unitats d'energia elèctrica segons si es fa servir cogeneració (cas de l'esquerra) o producció per separat (cas de la dreta). En el cas de la cogeneració es consumeixen 325 unitats d'energia primària mentre que en la producció per separat s'utilitzen 465 (200 per cobrir la demanda tèrmica i 265 per cobrir la demanda elèctrica).

#### - Factor d'ús d'energia

El factor d'ús d'energia (FUE) és la proporció d'energia obtinguda a la sortida respecte al consum de combustible. En el consum de combustible no es considera el combustible utilitzat per produir calor útil, aquest es pot calcular suposant que l'eficiència típica d'una caldera ( $EFF_H$ ) és del 85%.

$$FUE = \frac{E}{Q_F - \frac{Q_H}{EFF_H}} \quad (\text{Eq. 4})$$

On:

FUE és el factor d'ús d'energia

E és l'energia elèctrica obtinguda

$Q_H$  és l'energia tèrmica útil obtinguda

$Q_F$  és l'energia del combustible utilitzat

$EFF_H$  és el rendiment del procés de transformació de l'energia del combustible en energia tèrmica

#### - Estalvi d'energia primària

L'estalvi d'energia primària (PES) en producció combinada és la relació entre l'energia primària utilitzada en el cas de la producció per separat i la que es fa servir en el cas de la producció combinada.

$$PES (\%) = \left( 1 - \frac{Q_F}{\frac{E}{\eta_{Eref}} + \frac{Q_H}{\eta_{Href}}} \right) \cdot 100 \quad (\text{Eq. 5})$$

On:

PES és l'estalvi d'energia primària

E és l'energia elèctrica obtinguda

$Q_H$  és l'energia tèrmica útil obtinguda

$Q_F$  és l'energia del combustible utilitzat

$\eta_{Href}$  és el valor de referència del rendiment per a la producció de calor per separat

$\eta_{Eref}$  és el valor de referència del rendiment per a la producció d'electricitat per separat

L'energia tèrmica que es pot recuperar dels motors primaris es pot manifestar en forma de gasos calents d'escapament o bé en forma d'aigua calenta i es pot recuperar de dues maneres:

- Ús directe de l'escapament per recuperar calor del procés.
- Ús indirecte a través d'intercanviadors per produir aigua calenta que es pot fer servir per l'escalfament d'espais. Per aplicacions que necessitin més energia tèrmica o temperatures més elevades es pot aportar calor suplementari a través d'un cremador. En els sistemes de producció combinada (CHP) el nivell de recuperació de les pèrdues d'energia depenen de la tecnologia emprada.

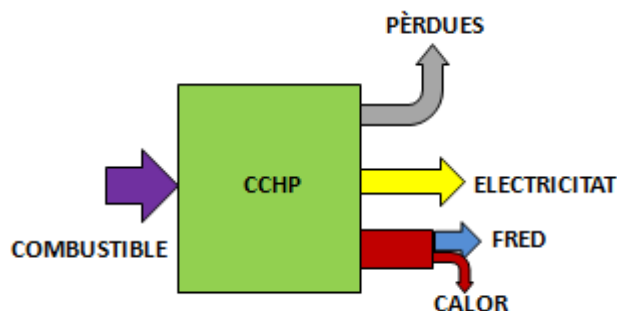
## 2.2. Trigeneració

La trigeneració és una forma de poligeneració que consisteix en l'obtenció de fred, a més a més de calor i electricitat a partir d'una mateixa font d'energia primària. Aquest procés és similar a la cogeneració però més ampli.

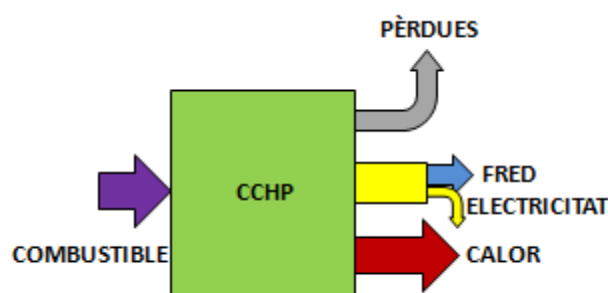
En els sistemes CHP, al no alliberar al medi la calor obtinguda en el cicle termodinàmic (dissenyat per obtenir electricitat) i malbaratant-la, es fa servir normalment per a la calefacció en edificis o per a l'escalfament d'aigua. La viabilitat econòmica d'una instal·lació CHP dependrà en gran mesura de la utilització d'aquesta energia tèrmica però al llarg de l'any només és necessària la calefacció durant uns mesos en un determinat edifici. La durada d'aquest període dependrà del lloc de construcció i les característiques de l'edifici. Tot i així, aquesta energia tèrmica pot ser utilitzada per refrigeració durant la temporada on no és necessària la calefacció donant lloc a la trigeneració.

La trigeneració no és més que una extensió del concepte de cogeneració a través de l'addició d'equips de producció de fred per als mesos més calorosos. Les instal·lacions de trigeneració clàssiques consisteixen en instal·lar un refrigerador d'absorció a una unitat de cogeneració de manera que aquest funcioni amb la calor generada per la font. Amb aquest mètode s'aprofita la calor durant tot l'any i es soluciona així el principal problema de la cogeneració.

Els diferents sistemes CCHP es poden diferenciar segons la manera de connectar el refrigerador. Si es fa servir un refrigerador activat tèrmicament es connectarà després de la font d'energia primària per tal de transformar la calor en fred (figura 2.2). En canvi, si es fa servir un refrigerador mecànic per compressió, es connectarà després del generador elèctric per tal d'obtenir fred a partir d'una part de l'energia elèctrica generada (figura 2.3)



**Figura 2.2:** Balanç energètic d'un sistema de trigeneració amb un refrigerador activat tèrmicament Font: elaboració pròpia



**Figura 2.3:** Balanç energètic d'un sistema de trigeneració amb un refrigerador mecànic per compressió. Font: elaboració pròpia

Tot i que un sistema de trigeneració es pot formar de diferents maneres, aquests tipus de sistemes acostumen a estar formats per una unitat CHP, un refrigerador dels esmentats anteriorment, un sistema d'emmagatzematge de calor i un sistema d'emmagatzematge d'electricitat.

### 2.2.1. Conversió d'energia en trigeneració

Existeixen diferents sistemes destinats a satisfer la demanda d'energia elèctrica en habitatges a partir de la trigeneració:

- **Sistemes de producció d'energia centralitzats**

Es connecta l'habitatge a la xarxa elèctrica i s'instal·la dins un sistema per escalfar-lo o refredar-lo per satisfer la demanda d'energia tèrmica. El sistema inclou una caldera de condensació convencional capaç de produir calor per a calefacció i escalfament d'aigua amb un rendiment del voltant del 90%. També disposa d'un compressor de refrigeració capaç de proporcionar aire fred.

L'eficiència de l'equip de refrigeració ve donada pel coeficient de rendiment o COP. El  $COP_c$  es defineix com la relació entre l'energia pel refredament desitjada a la sortida i la d'entrada.

El balanç energètic per a cadascun dels subsistemes (elèctric i tèrmic) és el següent:

$$E_{xarxa} = E + \frac{C}{COP_C} \quad (\text{Eq. 6})$$

$$Q_b = Q + Q_{hw} \quad (\text{Eq. 7})$$

On:

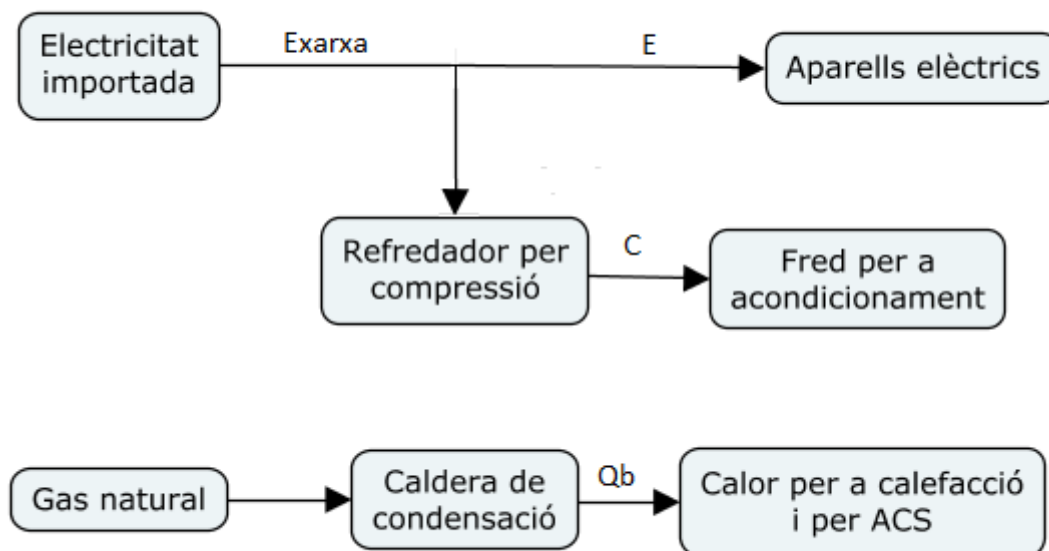
$E_{xarxa}$  és l'energia elèctrica obtinguda de la xarxa de subministrament

$E$  és l'energia elèctrica consumida

$C$  és la quantitat d'energia tèrmica consumida per refrigeració

$COP_C$  indica l'eficiència del refrigerador

$Q$  és la calor necessària (caldera, calefacció i producció d'aigua calenta)



**Figura 2.4:** Balanç energètic d'un sistema de producció d'energia centralitzat

Font: elaboració pròpia

### Sistemes de producció d'energia descentralitzats

En aquests sistemes existeixen dues solucions diferents per al subministrament d'electricitat.

- Sistema a la xarxa o obert

L'energia tèrmica i l'energia elèctrica són produïdes en aquest sistema a través de la tecnologia CHP i el fred per l'aire condicionat s'obté a través d'un refrigerador d'absorció que funciona a partir de la calor de la cogeneració. Cal dimensionar el sistema CHP d'acord amb la demanda de

calor de tal manera que es generi més energia de la que es consumeixi, exportant així l'excés a la xarxa.

Les característiques del motor primari als sistemes CHP donaran l'eficiència tèrmica i elèctrica del sistema. El  $COP_a$  d'un refrigeració d'absorció o d'adsorció es defineix com la proporció d'energia de refredament a la sortida respecte a l'energia tèrmica aportada a l'entrada.

El balanç energètic per a cadascun dels subsistemes (elèctric i tèrmic) és el següent:

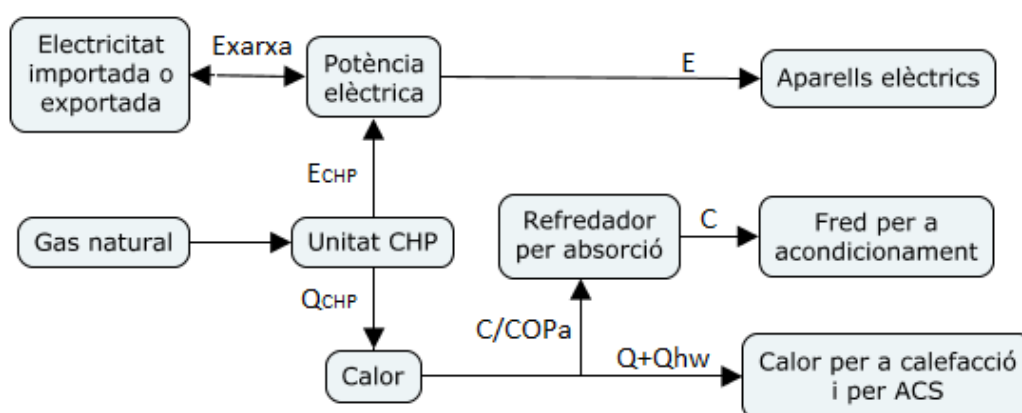
$$E_{CHP} = E - E_{xarxa} \quad (\text{Eq.8})$$

$$Q_{CHP} = Q + Q_{hw} + \frac{C}{COP_a} \quad (\text{Eq.9})$$

$E_{CHP}$  és l'energia elèctrica generada per la unitat de cogeneració

$Q_{CHP}$  és l'energia tèrmica generada per la unitat de cogeneració

$COP_a$  indica l'eficiència del refrigerador d'absorció/adsorció



**Figura 2.5:** Balanç energètic d'un sistema de producció d'energia descentralitzat

Font: elaboració pròpia

- Sistema aïllat de la xarxa

Aquests sistemes es dissenyen per satisfer la demanda màxima que pugui tenir el consumidor ja que no intercanvia electricitat amb la xarxa ja sigui important o exportant.

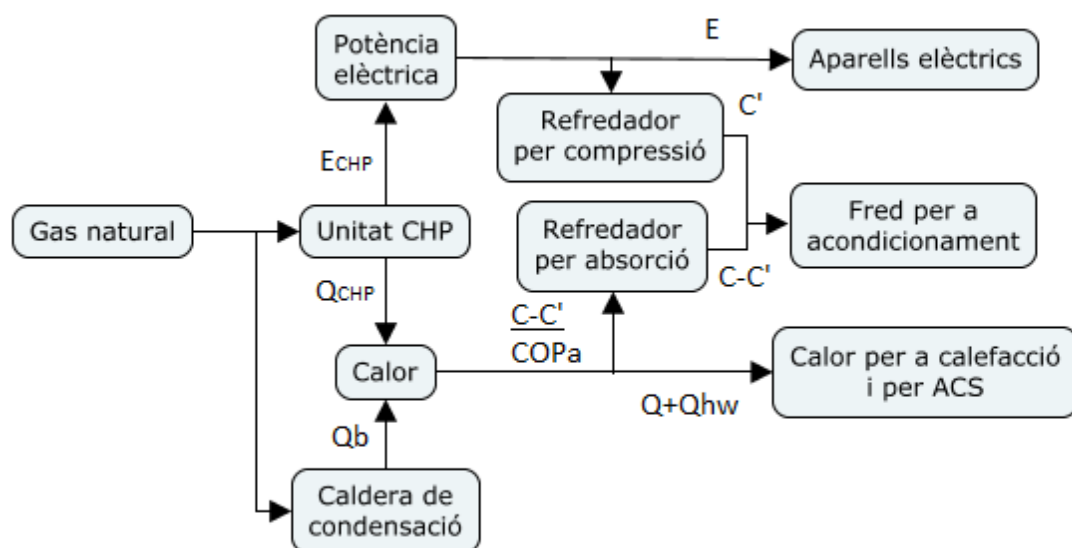
L'energia tèrmica provinent de la cogeneració pot ser suficient per cobrir la demanda de calefacció i refrigeració, per tant, aquesta descompensació es soluciona amb la instal·lació d'una caldera i un refrigerador d'absorció.

El balanç energètic per a cadascun dels subsistemes (elèctric i tèrmic) és el següent:

$$E_{CHP} = E + \frac{C'}{COP_C} \quad (\text{Eq.10})$$

$$Q_b + Q_{CHP} = Q + Q_{hw} + \frac{C - C'}{COP_a} \quad (\text{Eq.11})$$

On  $C'$  és la quantitat de fred produïda pel refrigerador per compressió mecànica



**Figura 2.6:** Balanç energètic d'un sistema de producció d'energia aïllat

Font: elaboració pròpia

Tot i que el terme cogeneració s'utilitza comunament per referir-se a la producció combinada de calor i electricitat a partir de combustibles fòssils, aquesta producció es pot originar a partir d'altres fonts d'energia primàries com la biomassa o l'energia solar entre d'altres.

Les aplicacions de tecnologies d'energia solar en sistemes de poligeneració estan guanyant importància en els darrers anys; especialment els mòduls fotovoltaics (PV), els col·lectors solar tèrmics (ST) i els sistemes híbrids fotovoltaics-tèrmics (PV/T).

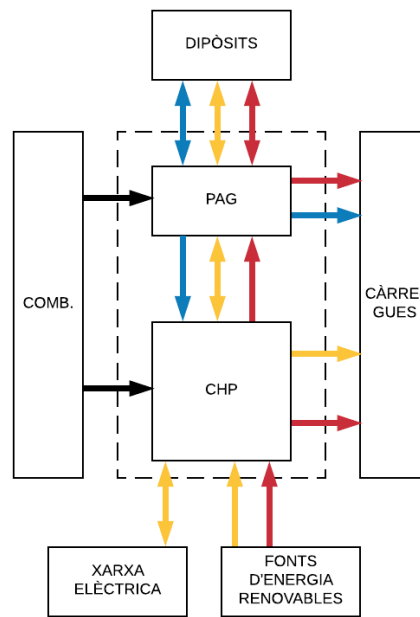
Tot i que un mòdul fotovoltaic podria ser utilitzat directament per produir electricitat i alimentar un refrigerador d'aigua, és més eficient des d'un punt de vista energètic i també econòmic l'ús de tecnologies de refredament per calor (sistemes d'absorció, adsorció o dessecació) alimentats per la calor provinent d'un sistema basat en energia solar.

De la mateixa manera que amb la calor produïda per un combustible, durant els mesos freds es fa servir l'energia del Sol per a la generació de calor i durant els mesos càlids es fa servir per al refredament.

Els tipus de sistemes basats en la generació descentralitzada es poden ordenar segons la seva complexitat de la següent manera:

- Cogeneració clàssica (una entrada d'energia primària, dos formes d'energia de sortida i una sola localització)
- Trigeneració (una o varies entrades d'energia primària, varies formes d'energia de sortida, una sola localització)
- Multigeneració distribuïda (una o varies entrades d'energia primària, varies formes d'energia de sortida, varies localitzacions)

La figura 2.7 representa una planta de trigeneració genèrica formada per la unitat CHP i una planta de generació addicional formada per equipaments destinats a generar calor, fred i/o electricitat. Els fluxos negres representen un flux de combustible, els grocs un flux elèctric, els vermells de calor i els blaus de fred.



**Figura 2.7:** Fluxos d'energia en la trigeneració  
Font: elaboració pròpia

### 2.2.2. Indicadors de rendiment en sistemes de trigeneració

### 2.2.3. Estalvi d'energia primària

Per definir l'eficiència dels sistemes CCHP és convenient fer una comparació amb els sistemes SHP. L'estalvi d'energia primària en sistemes SHP es calcula amb la següent expressió:

$$PES = 1 - \frac{1}{\frac{\eta_H}{\eta_{Href}} + \frac{\eta_E}{\eta_{Eref}}} \quad (\text{Eq.12})$$

On:

PES és l'estalvi d'energia primària

$\eta_H$  és la calor anual obtinguda dividida entre l'energia del combustible utilitzat com a font d'energia primària.

$\eta_{Href}$  és el valor de referència del rendiment per a la producció de calor per separat.

$\eta_E$  és la electricitat anual obtinguda dividida entre l'energia del combustible utilitzat com a font d'energia primària.

$\eta_{Eref}$  és el valor de referència del rendiment per a la producció d'electricitat per separat.



L'expressió per al càlcul de l'estalvi d'energia primària en sistemes CCHP no està estandarditzada, tot i així als països on es fa servir aquesta tecnologia es calcula amb la següent expressió:

$$PES (\%) = \left( 1 - \frac{Q_F}{\frac{E}{\eta_{Eref}} + \frac{Q_H}{\eta_{Href}} + \frac{C}{COP_{ref} \eta_{Href}}} \right) \cdot 100 \quad (\text{Eq.13})$$

On:

PES és l'estalvi d'energia primària

$Q_F$  és el consum de combustible de la instal·lació

$E$  és la quantitat d'electricitat generada

$Q_H$  és la quantitat de calor generada

$\eta_{Eref}$  és el valor de referència del rendiment per a la producció d'electricitat per separat.

$\eta_{Href}$  és el valor de referència del rendiment per a la producció de calor per separat

$C$  és l'energia generada pel refredament

$COP_{ref}$  és el rendiment de referència del refrigerador

L'eficiència tèrmica de referència és del voltant del 80% pel que fa a la cogeneració civil metre que puja fins al 90% en altres casos. El coeficient de rendiment de referència per als refrigeradors  $COP_{ref}$  és del voltant del 30%.

Aleshores, l'estalvi d'energia primària es pot calcular de les següents maneres:

$$PES (\%) = \left( 1 - \frac{Q_F}{\frac{E + \frac{C}{COP_{ref}}}{\eta_{Eref}} + \frac{Q_H}{\eta_{Href}}} \right) \cdot 100 = \left( 1 - \frac{Q_F}{\frac{E_{sys}}{\eta_{Eref}} + \frac{Q_{sys}}{\eta_{Href}}} \right) \cdot 100 \quad (\text{Eq.14})$$

$$E_{sys} = E + \frac{C}{COP_{ref}} \quad (\text{Eq.15})$$

On:

PES és l'estalvi d'energia primària

$Q_F$  és el consum de combustible de la instal·lació

$E$  és la quantitat d'electricitat generada

$Q_H$  és la quantitat de calor generada

$\eta_{Eref}$  és el valor de referència del rendiment per a la producció d'electricitat per separat.

$\eta_{Href}$  és el valor de referència del rendiment per a la producció de calor per separat

$C$  és l'energia generada pel refredament

$COP_{ref}$  és el rendiment de referència del refrigerador

$E_{sys}$  és l'energia específica anual produïda pel sistema

Potència nominal (MW)	Gas natural, gas líquid	Oli, nafta, dièsel	Combustibles fòssils sòlids	Combustibles sòlids de rebuig
<1	0,38	0,35	0,33	0,23
>1-10	0,4	0,36	0,34	0,25

**Taula 2.1:** valors de referència de l'eficiència elèctrica [4]

En aquest format, l'expressió és similar a l'expressió utilitzada per calcular l'estalvi d'energia percentual en cogeneració quan l'energia per a la refrigeració es genera a través d'energia elèctrica. En sistemes tèrmics on el refredament es fa consumint l'energia tèrmica generada, l'estalvi d'energia primària ve definit de les següents formes:

$$PES (\%) = \left( 1 - \frac{Q_F}{\frac{E}{\eta_{Eref}} + \frac{Q_H + \frac{C}{COP_{ref}}}{\eta_{Href}}} \right) \cdot 100 = \left( 1 - \frac{Q_F}{\frac{E_{sys}}{\eta_{Eref}} + \frac{Q_{sys}}{\eta_{Href}}} \right) \cdot 100 \quad (\text{Eq.16})$$

$$Q_{sys} = Q_H + \frac{C}{COP_{ref}} \quad (\text{Eq.17})$$

On:

PES és l'estalvi d'energia primària

$Q_F$  és el consum de combustible de la instal·lació

$E$  és la quantitat d'electricitat generada

$Q_H$  és la quantitat de calor generada

$\eta_{Eref}$  és el valor de referència del rendiment per a la producció d'electricitat per separat.

$\eta_{Href}$  és el valor de referència del rendiment per a la producció de calor per separat

$C$  és l'energia generada pel refredament

$COP_{ref}$  és el rendiment de referència del refrigerador

$Q_{sys}$  és la calor específica anual produït pel sistema

#### - Eficiència energètica dels sistemes de trigeneració

Tot i la utilitat de definir l'estalvi d'energia primària, aquest és només una comparació entre l'estalvi que comporta un sistema CCHP amb un SEP així que no indica si el sistema a estudiar és

veritablement útil o no. El rendiment d'un sistema CCHP indica la relació entre l'energia produïda i l'energia realment útil i ve donat per la següent expressió:

$$EFF_{CCHP}(\%) = \frac{E_{sys} + Q_{sys}}{Q_F + E_{PV} + Q_{TP}} \cdot 100 \quad (\text{Eq.18})$$

On:

$EFF_{CCHP}$  és el rendiment del cicle de trigeneració

$E_{PV}$  és l'energia específica anual produïda pels panells fotovoltaics

$Q_{TP}$  és la calor específica anual produïda pels panells tèrmics

$E_{sys}$  és l'energia específica anual produïda pel sistema

$Q_{sys}$  és la calor específica anual produïda pel sistema

$Q_F$  és el consum específic de combustibles del sistema

En el cas que la font d'energia primària emprada sigui una font renovable, aquesta energia primària serà considerada la quantitat d'energia produïda, és a dir, no es considerarà l'eficiència del procés de conversió.

### 3. Microsistemes combinats

#### 3.1. Tecnologies de microcogeneració

Les tecnologies CHP són aquelles destinades a la producció d'energia elèctrica i que simultàniament recuperen la calor malbaratada del cicle per a calefacció, refredament o escalfament d'aigua.

Les tecnologies de microcogeneració o mCHP són tots aquells sistemes de cogeneració que produeixen entre 15 i 35 kW d'energia elèctrica o menys. Les aplicacions d'aquests sistemes van des de cases unifamiliars fins a edificis de vivendes o d'oficines. En aquest tipus de sistemes, sovint es produeix l'energia elèctrica in situ a partir d'un combustible en un conjunt format per el motor primari i el generador. La combustió produeix calor recuperable en dues formes: refrigerant del motor escalfat i gasos d'escapament escalfats. L'ús d'aquesta energia tèrmica per a calefacció i refrigeració és el motiu per el qual aquests sistemes tenen un rendiment alt.

Els sistemes de cogeneració tenen quatre elements bàsics:

- Font d'energia primària (sovint motor o caldera)
- Generador elèctric
- Sistema de recuperació de calor
- Sistema de control

L'eficiència global d'un cicle de cogeneració depèn de diversos factors tals com la tecnologia utilitzada, el tipus de combustible, el punt de treball, la mida de la unitat o el potencial d'escalfament. Aquestes característiques guarden una relació molt estreta amb el motor primari i, per tant, els sistemes mCHP, es classifiquen segons el seu motor primari i segons d'on es deriva la seva font d'energia.

Els sistemes mCHP actuals es basen en els següents enginyers:

- Turbines de vapor

Poden operar en un rang de pressions del vapor molt ampli i es dissenyen per tal de proporcionar els requeriments tèrmics necessaris a partir de l'ús de contrapressió o extracció de vapor a la temperatura i pressió apropiades.

- Turbines de gas

Produeixen un calor de sortida elevat.

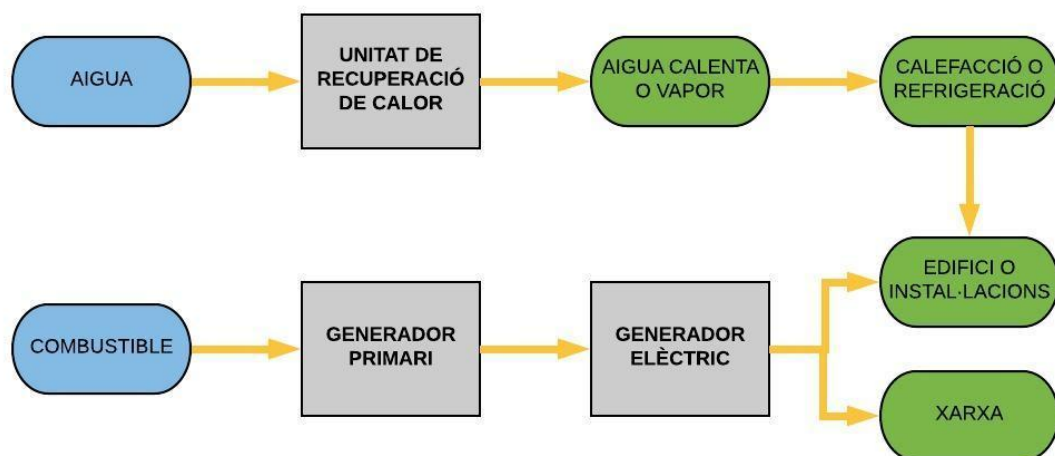
- Motors recíprocs

Són adients per aplicacions que requereixen aigua calenta o vapor a baixa pressió.

- Motors Stirling

- Cèl·lules de combustible

Utilitzen la calor de rebuig per a calefacció i escalfament d'aigua.



**Figura 3.1:** Fluxos d'energia en tecnologies CHP

Font: elaboració pròpia

### 3.1.1. Turbines de vapor

La turbina de vapor és la tecnologia més utilitzada en les plantes industrials de producció d'energia elèctrica. Els cicles termodinàmics del qual formen part aquestes turbines són els cicles per a plantes de vapor convencionals; el cicle de Hirn (amb vapor sobreescalfat) o el cicle de Rankine (amb vapor saturat).

El generador de vapor s'encarrega de vaporitzar aigua i convertir-la en vapor saturat o sobreescalfat a partir de la calor generada en una combustió. Aquest vapor produeix energia mecànica al seu pas per una turbina que serà transformada en energia elèctrica per un generador.

La font freda d'aquest cicle termodinàmic és el condensador, que fa tornar els vapors d'aigua que surten de la turbina al seu estat líquid. Per a evacuar la calor cap a fora, normalment es fa servir aigua com a agent refrigerant.

El rendiment tèrmic es pot definir a partir de les transferències de calor o bé de les temperatures de les següents maneres:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out}}{\dot{Q}_{in}} = 1 - \frac{\vartheta_{out}}{\vartheta_{in}} \quad (\text{Eq.19})$$

On:

$\dot{Q}_{in}$  i  $\dot{Q}_{out}$  són els fluxos de calor d'entrada i de sortida respectivament

$\vartheta_{in}$  i  $\vartheta_{out}$  són les temperatures a la caldera i a la part de vapor del condensador respectivament

Les turbines de vapor són una tecnologia consolidada i amb una vida útil molt llarga que les fa molt fiables si tenen un manteniment adequat. Tot i així, aspectes com l'eficiència de la conversió termoelèctrica, el procés de restricció relativament llarg i els rendiments de càrrega baixos són inconvenients per a la seva elecció. La taula 3.1 mostra les característiques i els indicadors de rendiment dels sistemes de cogeneració que fan ús d'aquestes turbines:

Característiques	Turbines de vapor industrials	Microturbines de vapor
Rendiment elèctric (%)	15-38	18-27
Rendiment tèrmic (%)	80	65-75
Rendiment global (%)	75	50-75
Relació potència elèctrica - potència tèrmica	0,1 - 0,3	0,4 - 0,7
Temps d'engegada	1 h – 1 dia	60 s
Rang de potències	50 kW – 250 MW	5 kW – 250 kW
Ús d'energia tèrmica	Vapor a alta o baixa pressió	Calefacció, aigua calenta, vapor a baixa pressió

**Taula 3.1:** Característiques de les turbines

#### - Millora de l'eficiència tèrmica de la turbina

L'eficiència tèrmica es pot millorar augmentant la pressió i la temperatura de la font calenta o bé, reduint la pressió i la temperatura de la font freda.

#### **Augment de pressió i temperatura a la font calenta**

Aquest mètode està condicionat per una sèrie de restriccions tecnològiques; no es pot augmentar indiscriminadament la temperatura, ja que determinats materials no poden treballar a partir de certa temperatura i tampoc es pot augmentar la pressió més del que aguantant la resistència mecànica dels materials. Aquest increment de pressió, també origina un augment en la humitat a l'àrea final de la turbina i, aquest excés de gotes d'aigua juntament amb les altes velocitats, augmenta la erosió de la turbina.

L'augment en l'eficiència s'aconsegueix a partir del sobreescalfament intermediari de l'agent tèrmic que ve de la font calenta del cicle termodinàmic. Aquest sobreescalfament suposa una modificació del cicle termodinàmic i del generador de vapor que comporta un augment de la inversió inicial, per tant, només s'aplica a grups d'alta potència (>100 MW) amb un ús de potència anual d'alta duració.

## Reducció de la pressió i la temperatura a la font freda

L'eficiència també augmenta a mesura que baixa la pressió i/o la temperatura de la font freda ja que baixarà la temperatura del vapor al condensador. D'aquesta manera, la reducció d'1°C a la temperatura de condensació és equivalent a l'efecte produït per l'increment d'entre 10 i 15°C en la temperatura de l'agent tèrmic pel qual aquest mètode és molt productiu. Per aconseguir una temperatura de condensació baixa és necessària l'actuació de fluids refrigerants amb un flux i un nivell tèrmic apropiats.

### 3.1.2. Microturbines de gas

Les turbines de combustió interna són motors primaris utilitzats en cogeneració ja que tenen un rang de potències ampli a més de ser segurs i fiables.

Els sistemes de cogeneració amb turbina de gas estan formats per una cambra de combustió i un compressor i una turbina en el mateix eix, de tal manera que la turbina proporcioni el treball mecànic útil a l'eix.

Les microturbines són petites turbines de gas rotades per gasos a altes pressions i temperatures provinents d'una combustió i afegits a aire comprimit que s'expandeixen a través seu i actuen sobre l'eix d'un motor per produir electricitat. Aquestes màquines acostumen a tindre una potència de sortida d'entre 25 i 300 kW i normalment fan servir gas natural, diesel, petroli o alcohol com a combustible.

Les microturbines, al igual que algunes turbines utilitzades en processos industrials, tenen un sistema de recuperació de la calor d'escapament utilitzat per preescalfar l'aire de la combustió.

Les turbines no recuperatives tenen un rendiment aproximat d'un 15% funcionant amb gas natural mentre que les microturbines que disposen de recuperació tenen un rendiment elèctric d'entre un 20 i un 30%. Aquesta diferència ve donada pel preescalfament d'aire que es duu a terme a la recuperació ja que redueix la quantitat de combustible necessària. El rendiment global del cicle és del 85% aproximadament i s'assoleix quan les microturbines s'acoblen als components tèrmics per recuperar la calor.

Les microturbines tenen una vida més llarga que els motors de combustió ja que no tenen moltes parts mòbils i disposen de lubricació. Per tant, les microturbines tenen un menor cost d'explotació per kW produït.

Un altre avantatge de les microturbines és que la seva mida és relativament petita tenint en compte la potència que són capaces de produir. També són lleugeres i tenen un nivell baix d'emissions.

Però, el avantatge més important de les microturbines és que poden funcionar a partir de diferents tipus de combustibles com el recuperat o el bio combustible.

El desavantatge de les microturbines és que tenen un rendiment elèctric inferior. A més a més, en alçades i temperatures ambient altes, la potència d'escapament i el rendiment es veuen reduïts ja que la temperatura ambient afecta directament a la temperatura de l'aire a l'entrada. Una turbina de gas augmentarà el seu rendiment com més fred sigui l'aire que entra al seu interior.

### **3.1.3. Motors tèrmics de combustió interna**

Els motors de combustió interna són molt utilitzats i tenen molts usos. Funcionen a partir de l'explosió del combustible que es crema en contacte directe amb el motor. Aquests motors, per funcionar, necessiten combustible, aire i un mecanisme capaç de comprimir la mescla d'aire i combustible.

Els sistemes de cogeneració que funcionen a partir d'un motor de combustió interna es componen del propi motor, un generador, un sistema de recuperació de calor, un sistema d'escapament, controls i un encapsulat acústic. El motor farà funcionar el generador i la calor útil es recuperarà a partir de l'escapament del motor i els sistemes de refrigeració.

Per a la generació d'energia elèctrica s'utilitzen dos tipus de motors de combustió interna:

- Motors d'encès per espurna (amb endoll, Otto)
- Motors de combustió interna encesos per compressió (Dièsel)

L'eficiència d'un sistema CHP dissenyat per produir electricitat a amplia escala és d'un 30% aproximadament mentre que durant un cicle d'explotació combinat puja fins aproximadament un 48%. La calor dels gasos de la combustió es perd en el moment en que aquests s'alliberen a l'atmosfera.

En els sistemes mCHP basats en motors de combustió interna es recupera la calor de l'aigua de refrigeració, de l'oli de la màquina i del circuit d'escapament dels gasos de la combustió per tal d'obtenir vapor d'aigua a baixa pressió o aigua calenta. Aquest vapor o aigua obtingut es farà servir més endavant per a calefacció, refrigeració o escalfament d'aigua.

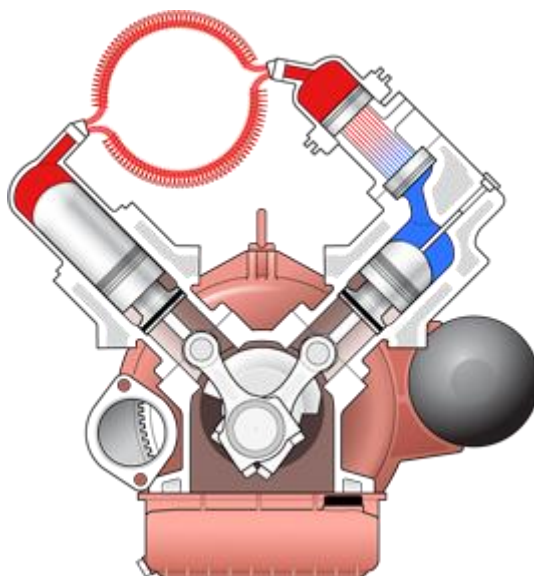
### **3.1.4. Motors Stirling**

Aquests tipus de motors poden funcionar tant amb metà com amb hidrocarburs, hidrogen, biomassa o calor provinent de fonts d'energia renovables i, a més a més, es poden instal·lar sistemes basats en aquesta tecnologia en medis urbans. Es basen en una tecnologia mecànica, fiable i que no requereix de molta infraestructura.

Aquests tipus de motors fan servir una diferència de temperatures per tal de produir moviment en el seu eix. Dins dels cilindres d'un motor Stirling es conté aire o un gas com heli o hidrogen ja que per a una quantitat fixa de gas en volum constant, la seva temperatura i pressió són directament proporcionals. D'aquesta manera, la pressió augmentarà a mesura que s'incrementi la temperatura. També pujarà la temperatura d'una quantitat fixa de gas a mesura que aquest es comprimeix.



El rendiment elèctric d'un motor Stirling oscil·la entre un 10 i un 25% però el rendiment global d'un cicle combinat basat en un d'aquests motors és significativament més gran.



**Figura 3.2:** Esquema d'un motor Stirling [20]

### 3.1.5. Cèl·lules de combustible

Les cèl·lules de combustible consisteixen en un procés electroquímic que genera electricitat a partir de l'energia emmagatzemada en el gas natural o l'hidrogen i com a subproducte genera també calor. Això ho aconsegueixen a partir de la combinació d'hidrogen i oxigen en presència d'un catalitzador.

Les cèl·lules de combustible que incorporen un reformador de combustible fan servir l'hidrogen de qualsevol hidrocarbur.

Aquestes cèl·lules fan servir un procés electroquímic similar al de les bateries i produeixen corrent continu però, mentre una bateria pot produir energia només mentre duri la seva energia química emmagatzemada, una cèl·lula de combustible ho pot fer indefinidament. Aquestes cèl·lules es classifiquen segons el tipus d'elèctrode que fan servir i se'n distingeixen els següents tipus:

- Alcalines (AFC)
- Amb àcid fosfòric (PAFC)
- Amb carbonat desfet (MCFC)
- Amb òxid sòlid (SOFC)
- Amb una membrana d'intercanvi de protons (PEMFC)

Les cèl·lules de combustible tenen una relació de potència elèctrica a tèrmica de gairebé 1-1 i generen una proporció d'energia elèctrica més elevada que altres tecnologies de cogeneració. Aquesta tecnologia també té un alt rendiment elèctric en condicions de càrrega variables i emet poques emissions.

### 3.2. Comparació de les diferents tecnologies de cogeneració en sistemes mCHP

Gràcies al nombrós tipus del sistemes de microcogeneració que existeixen i a tots els seus avantatges, aquesta tecnologia ha augmentat la seva popularitat en els darrers anys. L'ús d'aquests sistemes podria substituir l'ús de calderes en habitatge amb la possibilitat afegida de vendre electricitat a la xarxa i emmagatzemar la calor sobrant. La taula 3.2 mostra les tecnologies CHP més adients per a l'ús residencial. Tal i com es pot veure, els motors de combustió interna presenten un rendiment elèctric superior al de les microturbines i els motors Stirling. Les cèl·lules de combustible haurien de tenir el rendiment elèctric més alt de totes les tecnologies mCHP però aquesta eficiència no està demostrada.

	<b>Motors recíprocs</b>	<b>Microturbines</b>	<b>Motors Stirling</b>	<b>Cèl·lules de combustible</b>
<b>Potència elèctrica (kW)</b>	10-200	25-250	2-50	2-200
<b>Rendiment elèctric a plena càrrega (%)</b>	24-45	25-30	15-25	40
<b>Rendiment elèctric a mitja càrrega (%)</b>	23-40	20-25	25	40
<b>Rendiment global (%)</b>	75-85	75-85	75-85	75-85
<b>Relació de potència tèrmica/elèctrica</b>	0.9-2	1.6-2	3-3.3	0.9-1.1
<b>Nivell de temperatura de sortida (°C)</b>	85-100	85-100	60-80	60-80
<b>Combustible</b>	Gas natural, biogàs, dièsel	Gas natural, biogàs, dièsel, benzina, alcohols	Gas natural, biogàs, LPG, diversos combustibles sòlids o líquids	Hidrogen, gasos, metanol
<b>Temps entre manteniments (h)</b>	5.000-20.000	20.000-30.000	5.000	-
<b>Inversió (€/kW)</b>	990-1850	1100-1850	1600-2500	3000-4300
<b>Cost de manteniment (€/kW)</b>	1.5-2.5	0.6-1.8	1.8-3.1	1.2-3.7

**Taula 3.2:** Característiques tècniques de diferents unitats CHP

Per a un sistema mCHP és important definir la relació entre l'energia elèctrica i l'energia tèrmica proporcionades per la font d'energia primària. Aquesta relació s'anomena índex de cogeneració i depèn del dispositiu.

$$\gamma = \frac{E}{Q} \quad (\text{Eq.20})$$

On:

$\gamma$  és l'índex de cogeneració

E és la quantitat d'energia elèctrica produïda a la cogeneració

Q és la quantitat de calor útil produïda a la cogeneració i és calcula com la diferència entre la calor total produïda i qualsevol calor produïda en calderes separades. En el cas de les turbines, per l'extracció de vapor viu del generador de vapor abans de la turbina.

$\gamma > 1$	L'energia elèctrica predomina sobre la calor produïda (índex de cogeneració sobreunitari)
$\gamma < 1$	La calor predomina sobre l'energia elèctrica produïda (índex de cogeneració subunitari)

**Taula 3.3:** Índex de cogeneració

La majoria de tecnologies de cogeneració tenen un índex de cogeneració subunitari.

És interessant que l'índex de cogeneració estigui comprès entre 0,1 i 0,4 assumint que la suma de la potència elèctrica i la potència tèrmica és la unitat de potència

$$E + Q = 1 \quad (\text{Eq.21})$$

On:

E és la potència elèctrica

Q és la potència tèrmica

Donat un índex de cogeneració, la potència elèctrica i la potència tèrmica es podem calcular com:

$$E = \frac{\gamma}{\gamma + 1} \quad (\text{Eq.22})$$

$$Q = \frac{1}{\gamma + 1} \quad (\text{Eq.23})$$

L'índex de cogeneració també té afecta als índex de rendiment dels cicle mCHP (PES i rendiment global). Assumint que un sistema de cogeneració té un PES del 5%, per produir la mateixa potència de sortida amb un rendiment elèctric del 40% i un tèrmic del 80%, la energia d'entrada dependrà de l'índex de cogeneració i serà la següent:

Per un sistema SHP:

$$Q_{SHP} = \frac{E}{\eta_e} + \frac{Q}{\eta_{th}} = \left( \frac{10}{4} \cdot \frac{\gamma}{\gamma + 1} + \frac{10}{8} \cdot \frac{1}{\gamma + 1} \right) \quad (\text{Eq.24})$$

On:

$Q_{SHP}$  és la potència tèrmica del sistema SHP

$\gamma$  és l'índex de cogeneració

$E$  és la potència elèctrica

$Q$  és la potència tèrmica

$\eta_e$  és el rendiment elèctric

$\eta_{th}$  és el rendiment tèrmic

Per un sistema CHP:

$$PES = 1 - \frac{Q_{CHP}}{Q_{SHP}} \quad (\text{Eq.25})$$

$$Q_{CHP} = 0,95 \cdot Q_{SHP} = 0,95 \cdot \left( \frac{10}{4} \cdot \frac{\gamma}{\gamma + 1} + \frac{10}{8} \cdot \frac{1}{\gamma + 1} \right) \quad (\text{Eq.26})$$

On:

$Q_{CHP}$  és la potència tèrmica del sistema CHP

$Q_{SHP}$  és la potència tèrmica del sistema SHP

$PES$  és l'estalvi d'energia primària

El rendiment global en un sistema SHP depèn de l'índex de cogeneració de la següent manera:

$$EFF_{SHP} = \frac{\gamma + 1}{\frac{\gamma}{\eta_e} + \frac{1}{\eta_{th}}} \quad (\text{Eq.27})$$

Pel cas d'un sistema CHP, el rendiment global serà:

$$EFF_{CHP} = \frac{E + Q}{Q_{CHP}} = \frac{E + Q \cdot Q_{SHP}}{Q_{SHP} \cdot Q_{CHP}} = \eta_{SHP} \cdot \frac{Q_{SHP}}{Q_{CHP}} \quad (\text{Eq.28})$$

Per tant, dependrà de la següent manera de l'índex de cogeneració:

$$EFF_{CCHP} = \frac{1}{0,95} \cdot \frac{\gamma + 1}{\frac{\gamma}{\eta_e} + \frac{1}{\eta_{th}}} \quad (\text{Eq.29})$$

Tipus d'unitat	Índex de cogeneració
Turbina de gas de cicle combinat amb recuperació de calor	0,95
Turbina de vapor de contrapressió	0,45
Turbina de condensació del vapor d'extracció	0,45
Turbina de gas amb recuperació de calor	0,55
Motor de combustió interna	0,75

**Taula 3.4:** Índex de cogeneració segons la tecnologia

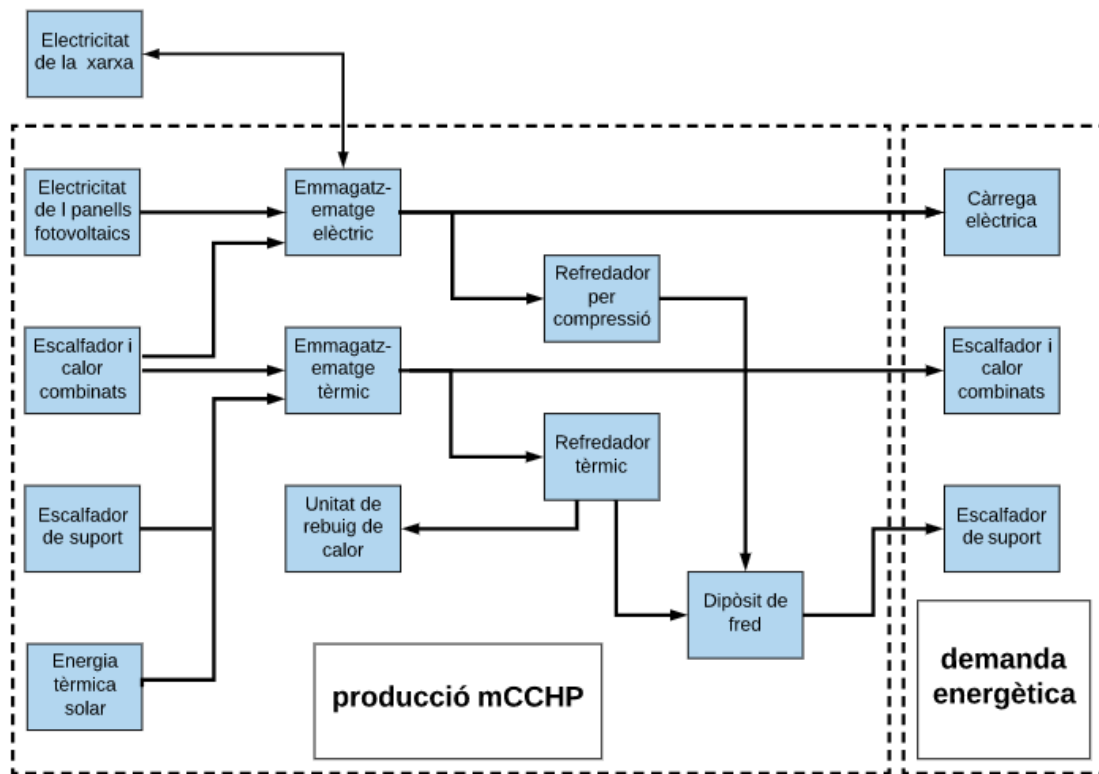
### 3.3. Sistemes mCCHP

#### 3.3.1. Arquitectura dels sistemes mCCHP

Els sistemes de trigeneració en edificis estan dissenyats per satisfer tant les demandes energètiques com les tèrmiques d'aquests ja sigui totalment o parcial. D'aquesta manera, el disseny d'un sistema mCCHP dependrà de la magnitud de les càrregues elèctriques i tèrmiques, si coincideixen o no i de l'estratègia operacional a seguir.

Aquests sistemes, l'arquitectura dels quals s'il·lustra a la figura 3.3, poden funcionar en condicions on les càrregues variïn i, en aquests casos, caldrà vendre o emmagatzemar l'energia tèrmica o elèctrica quan es produeixi en excés o comprar-la quan la producció no pugui cobrir la demanda. L'energia elèctrica sobrant es pot emmagatzemar en dispositius com bateries mentre que l'energia tèrmica que no s'utilitzi es pot emmagatzemar en tancs d'aigua o materials de canvi de fase.

Per dissenyar un sistema mCCHP cal conèixer la demanda energètica (corbes de càrrega) que caldrà satisfer amb antelació per tal de determinar l'arquitectura òptima per al sistema. Per determinar l'arquitectura del sistema també caldrà tenir en compte la satisfacció de la demanda energètica de la vivenda i la connexió o no a la xarxa elèctrica.



**Figura 3.3:** Arquitectura general dels sistemes mCCHP

Font: elaboració pròpia

Un diagrama que mostri l'estructura de l'arquitectura d'aquest tipus de sistemes consta de dos subsistemes:

- Subsistema de subministrament d'energia elèctrica

El model matemàtic d'aquest subsistema determina el funcionament de la bateria de la següent manera:

$$\frac{dW_B}{dt} = P_{CHP}(t) + P_{PV}(t) - P_{al}(t) - P_{air}(t) \quad (\text{Eq.30})$$

On:

$W_B$  és l'energia acumulada a la bateria en Joules

$P_{CHP}$  és la potència elèctrica generada pel mòdul CHP en watts

$P_{PV}$  és la potència elèctrica generada pel mòdul fotovoltaic en watts

$P_{al}$  és la potència elèctrica que correspon a la càrrega útil i a la interna del sistema (bombes i demés elements) en watts

$P_{air}$  és la potència elèctrica que consumeix l'aire condicionat en watts

- Subsistema de subministrament d'energia tèrmica

El model matemàtic d'aquest subsistema té com a nucli els balanços tèrmics al nivell de l'acumulador tèrmic i de l'edifici.

El balanç tèrmic de l'acumulador és el següent:

$$m_w c_w \frac{d\theta}{dt} = P_{CHP,t}(t) + P_{PT}(t) + P_{ph}(t) - P_{hl}(t) - P_{acl}(t) - P_{ACS}(t) \quad (\text{Eq.31})$$

On:

$m_w$  és la massa d'aigua de l'emmagatzemador de calor

$c_w$  és la calor específica de l'aigua de l'emmagatzemador de calor

$P_{CHP}$  és la potència tèrmica generada pel mòdul CHP

$P_{PT}$  és la potència tèrmica generada pels col·lectors solars

$P_{hl}$  és la potència tèrmica a l'edifici per cobrir les pèrdues per transmissió i ventilació

$P_{ACS}$  és la potència tèrmica pel circuit domèstic d'aigua calenta

### 3.3.2. Sistemes mCCHP amb refrigerador per compressió mecànica

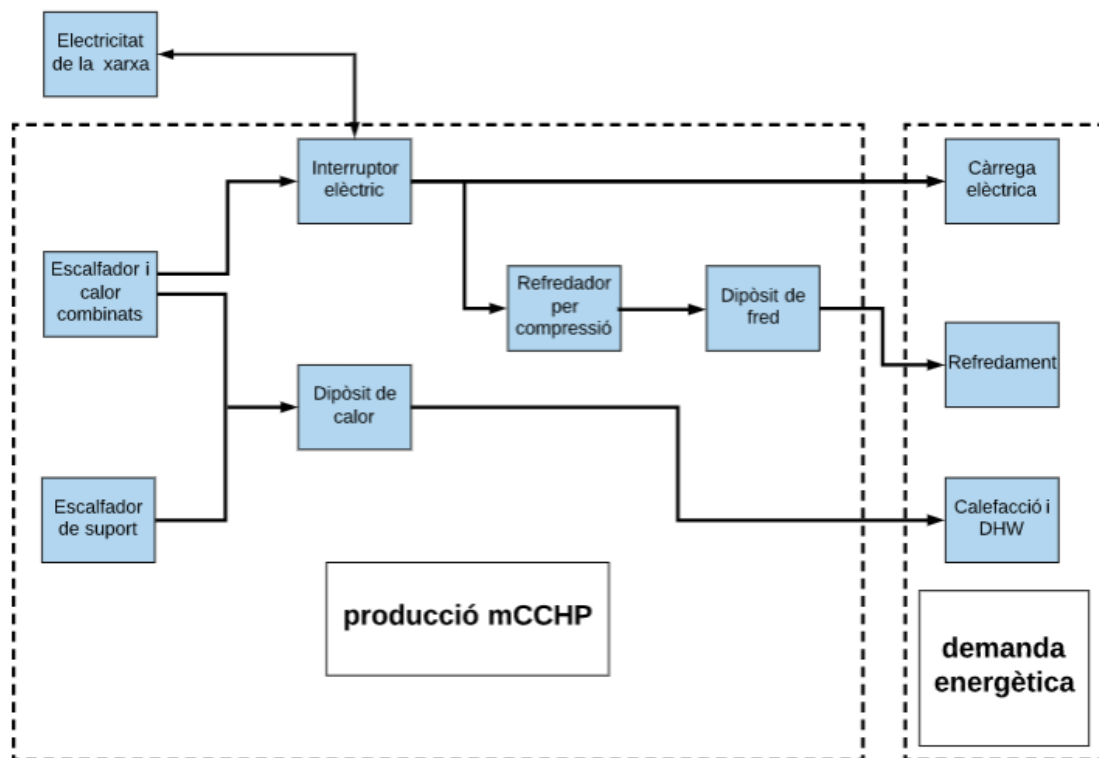
La demanda d'energia elèctrica total de l'edifici o la vivenda serà el consum dels aparells elèctrics que hi hagi sumat a la electricitat necessària per produir fred i haurà de ser coberta pel sistema mCCHP.

$$P_{CCHP} = E + \frac{C}{COP_C} - E_{xarxa} \quad (\text{Eq.32})$$

La demanda d'energia tèrmica de l'edifici o la vivenda es compon de l'energia necessària per a climatització i escalfament d'aigua i serà satisfeta pel sistema CCHP.

$$Q_{CCHP} = Q + P_{hw} \quad (\text{Eq.33})$$

L'arquitectura d'aquests sistemes s'il·lustra a la figura 3.4.



**Figura 3.4:** Sistema mCCHP amb refrigerador de compressió mecànica

Font: elaboració pròpia

### 3.3.3. Sistemes mCCHP amb refrigerador per compressió tèrmica

La demanda d'energia tèrmica de l'edifici o la vivenda es compon de l'energia necessària per la calefacció i la refrigeració de la vivenda i per l'escalfament d'aigua i serà satisfeta pel sistema CCHP.

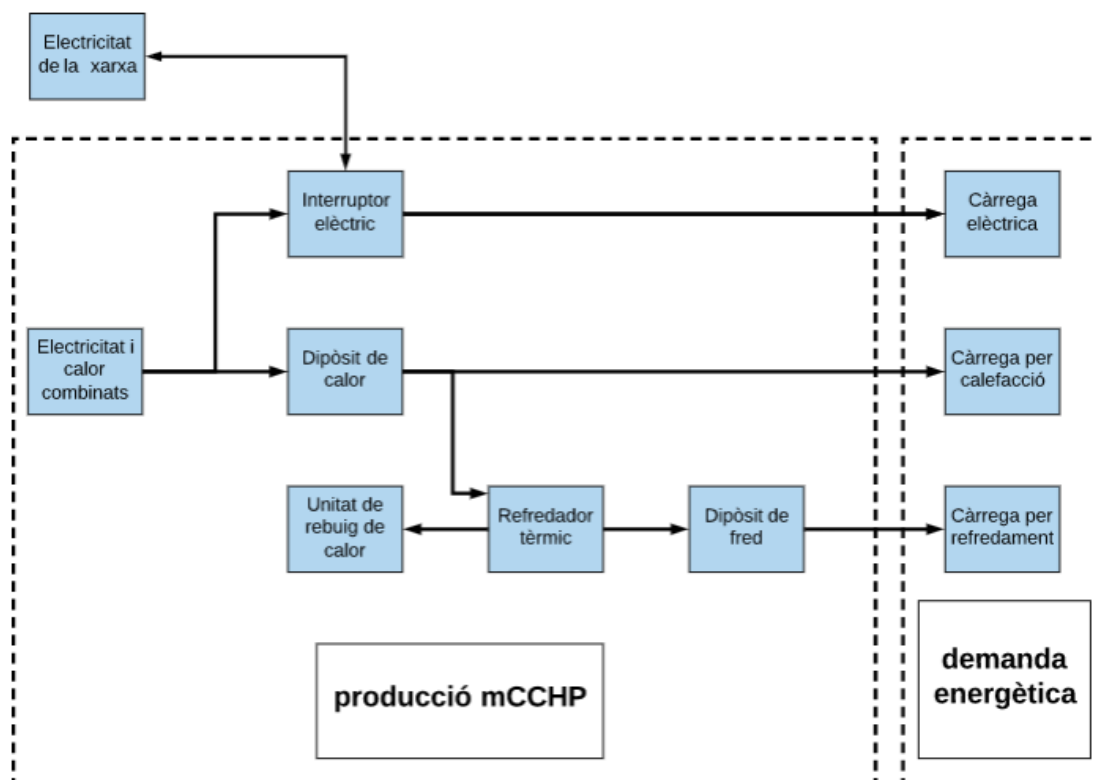
$$Q_{CCHP} = Q + Q_{hw} + \frac{C}{COP_a} \quad (\text{Eq.34})$$

La demanda d'energia elèctrica total de l'edifici o la vivenda serà el consum dels aparells elèctrics que hi hagi. La producció d'electricitat del mòdul CCHP serà la diferència entre la demanda elèctrica de l'edifici i l'energia obtinguda de la xarxa.

$$E_{CCHP} = E - E_{xarxa} \quad (\text{Eq.35})$$

L'arquitectura d'aquests sistemes s'il·lustra a la figura 3.5.





**Figura 3.5:** Sistema mCCHP amb refrigerador de compressió tèrmica

Font: elaboració pròpia

### 3.3.4. Modes d'operació de les unitats mCCHP

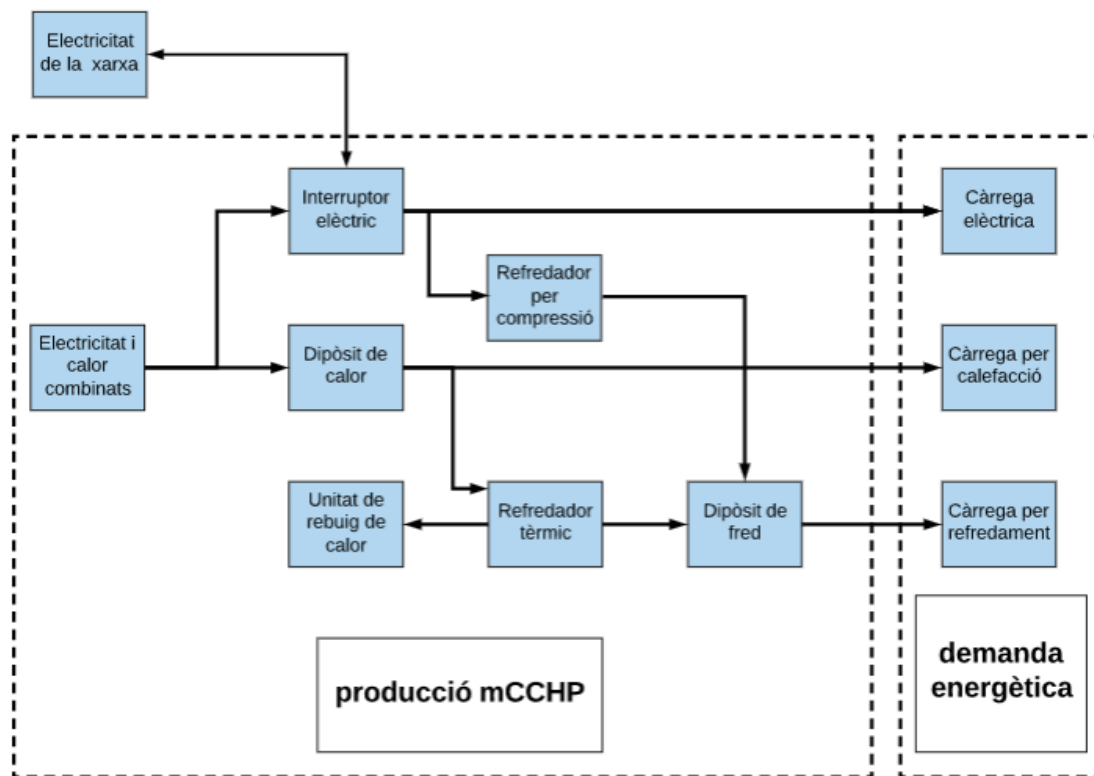
Les unitats mCCHP disposen de diversos modes d'operació per tal de satisfer les demandes necessàries:

- Mode d'igualació de calor

La unitat de cogeneració proporciona tota l'energia tèrmica que consumeix l'habitatge. D'aquesta manera, l'energia tèrmica útil que genera el sistema serà sempre igual a la demandada per les càrregues tèrmiques sempre i quan no es superi la capacitat del sistema.

$$Q_{CHP} = Q_{CCHP} \quad (\text{Eq.36})$$

Quan l'energia elèctrica generada no coincideixi amb la demandada es comprarà o es vendrà energia a la xarxa. Per tal d'operar en aquest mode, el sistema s'estructura com indica la figura 3.6.



**Figura 3.6:** Mode d'igualació de calor

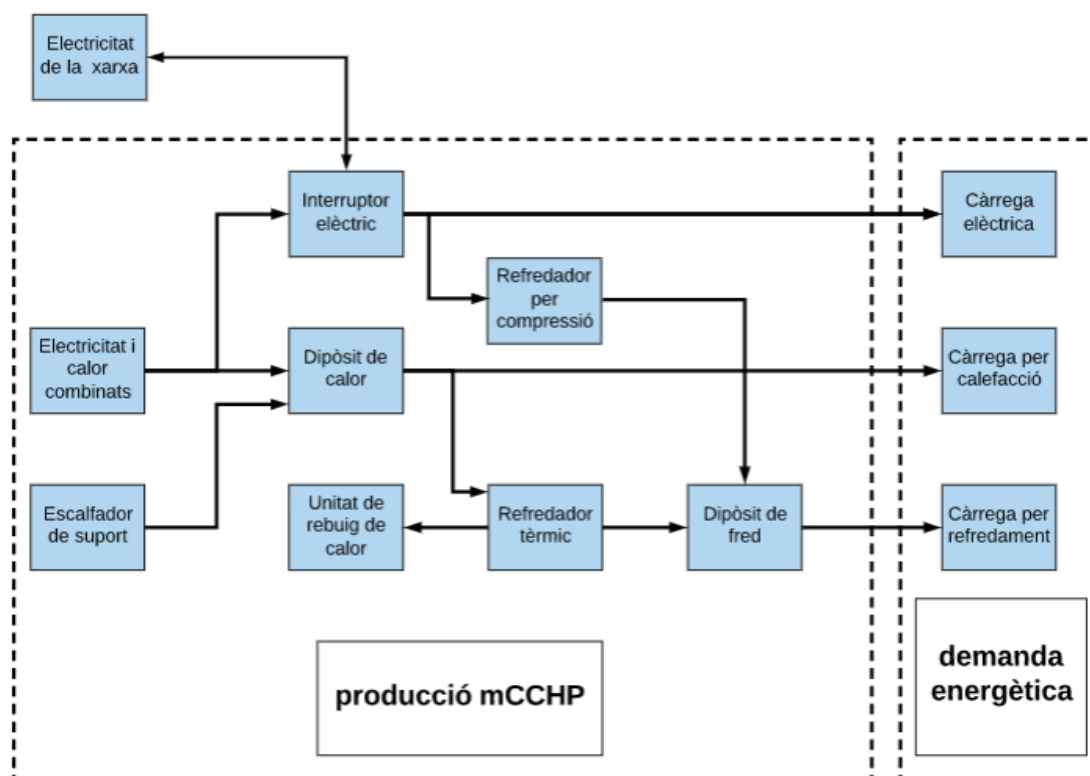
Font: elaboració pròpia

- Mode d'igualació de la càrrega tèrmica base

La unitat de cogeneració juntament amb una caldera de suport proporcionen tota l'energia tèrmica que consumeix l'habitatge per tal d'assegurar el funcionament del sistema en els moments on la demanda tèrmica sigui més alta. Aquest mode d'operació garanteix el subministrament de les càrregues tèrmiques mínimes i s'ajuda de la caldera de suport només quan es necessari i que romandrà en "stand-by".

$$Q_{CHP} = Q_{CCHP} - Q_{ad} \quad (\text{Eq.37})$$

El motor opera sempre a plena càrrega per satisfer la demanda elèctrica i en el cas que no coincideixi amb l'energia elèctrica demandada es comprarà o es vendrà a la xarxa. Per tal d'operar en aquest mode, el sistema s'estructura com indica la figura 3.7.



**Figura 3.7:** Mode d'igualació de la càrrega tèrmica

Font: elaboració pròpia

- Mode d'igualació de l'electricitat

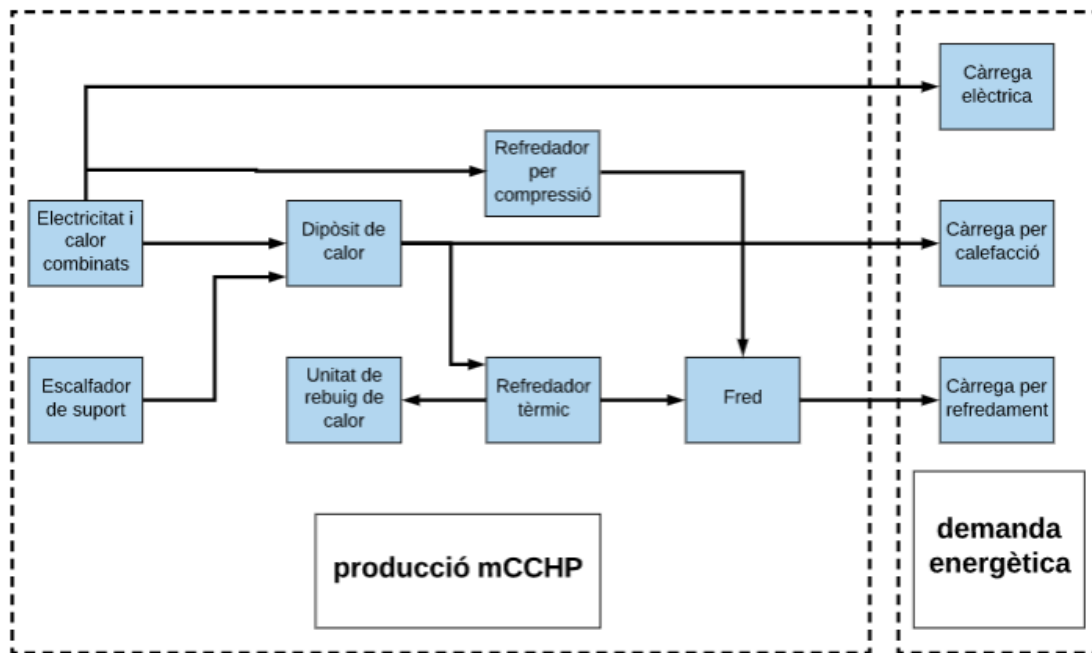
Tota l'energia elèctrica necessària és generada per la unitat de cogeneració de manera que l'energia generada sigui sempre igual a la demandada per les càrregues elèctriques.

$$E_{CHP} = E_{CCHP} \quad (\text{Eq.38})$$

En aquest cas, quan la calor generada a la cogeneració és inferior a la demandada per les càrregues tèrmiques es farà servir l'ajut d'una caldera de suport i quan aquest calor sigui superior a la demanda s'alliberarà al medi a través de refrigeradors o gasos d'escapament.

$$Q_{CHP} = Q_{CCHP} - Q_{ad} \quad (\text{Eq.39})$$

Per tal d'operar en aquest mode, el sistema s'estructura com indica la figura 3.8.



**Figura 3.8:** Mode d'igualació d'electricitat

Font: elaboració pròpia

- Mode d'igualació de les càrregues elèctriques base

Tota l'energia elèctrica necessària ve donada per la unitat de cogeneració i per un sistema auxiliar amb possibilitat també de comprar de la xarxa per satisfer la demanda en hores pic.

Balanç elèctric:

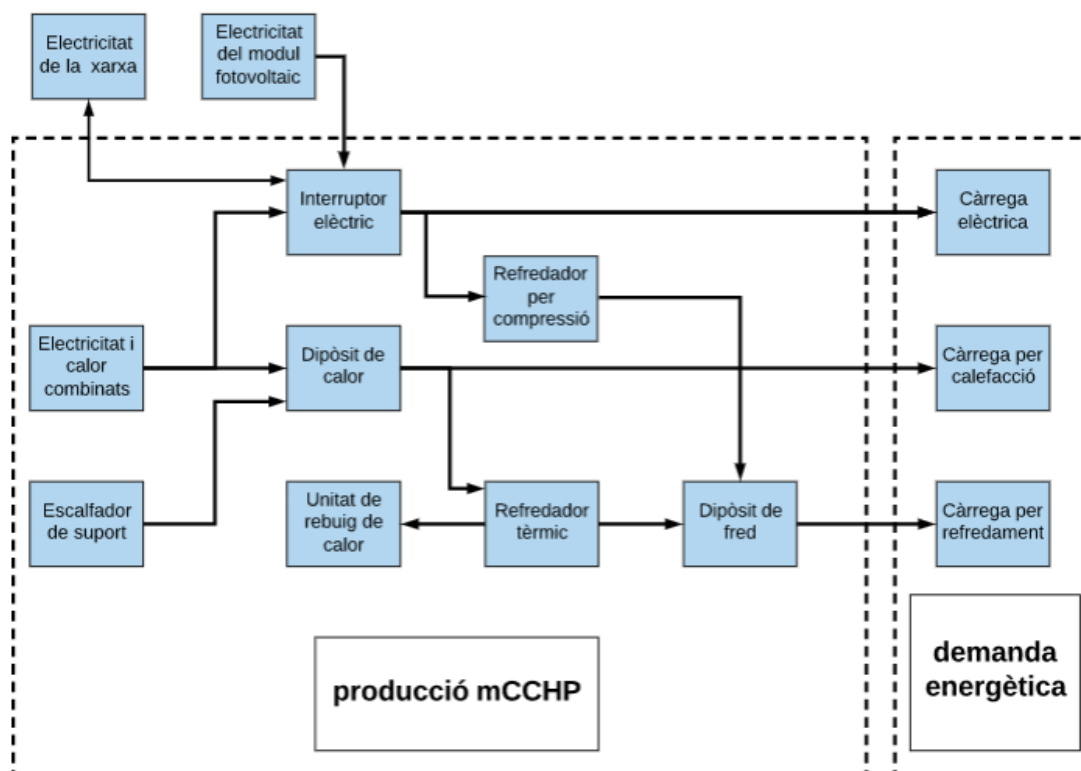
$$E_{CHP} = E_{CCHP} - E_{ad} - E_{xarxa} \quad (\text{Eq.40})$$

En aquest mode, el sistema de cogeneració es dissenya per cobrir la demanda elèctrica mínima segons la corba de demanda i, la resta d'energia, es comprarà de la xarxa. Pel que fa a la demanda d'energia tèrmica, serà coberta pel sistema de cogeneració amb l'ajut d'una caldera auxiliar en el cas necessari.

Balanç tèrmic:

$$Q_{CHP} = Q_{CCHP} - Q_{ad} \quad (\text{Eq.41})$$

Per tal d'operar en aquest mode, el sistema s'estructura com indica la figura 3.9.



**Figura 3.9:** Mode d'igualació de les càrregues elèctriques base

Font: elaboració pròpia

- Mode mixt

Aquest mode consisteix en una combinació dels modes de fer coincidir la calor i fer coincidir l'electricitat. S'alternarà entre aquestes dues polítiques segons els nivells de càrrega, el preu del combustible i el preu de l'electricitat per a cada període.

- Mode autònom

En aquest mode s'assegura la cobertura de les càrregues elèctriques i tèrmiques sense necessitat de connexió a la xarxa. És necessari que el sistema tingui capacitat elèctrica i tèrmica de reserva perquè en cas de que falli una unitat, les unitats restants puguin seguir cobrint la demanda de les càrregues. Els sistemes que treballin en mode autònom són els que requereixen d'una inversió inicial més elevada.

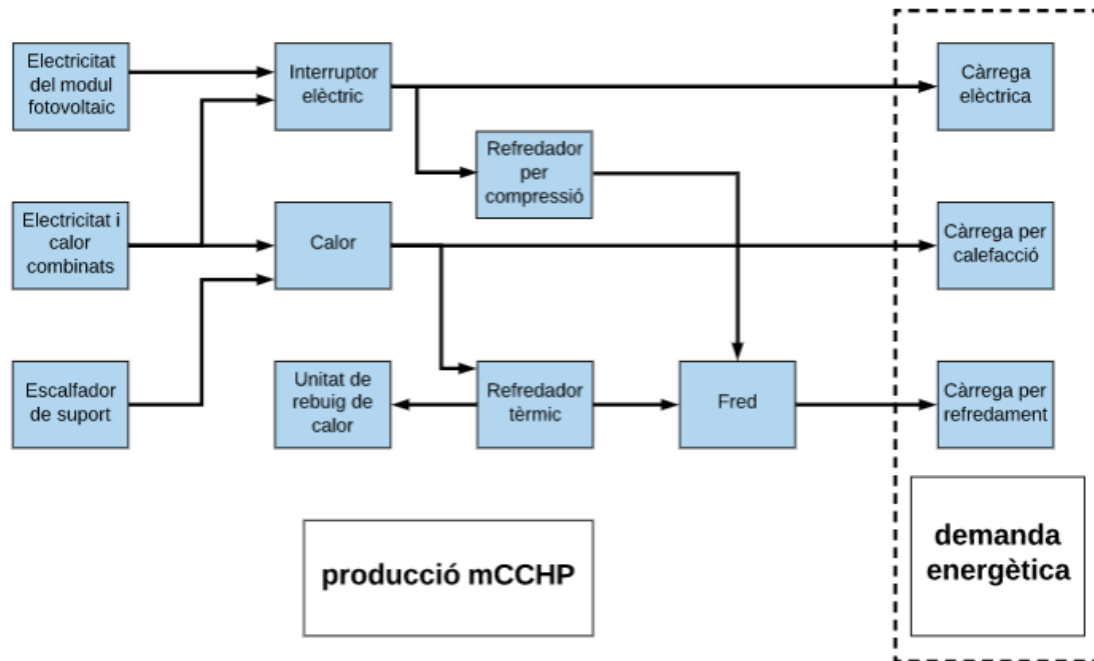
Balanç elèctric:

$$E_{CHP} = E_{CCHP} - E_{ad} = E + \frac{C'}{COP_C} - E_{ad} \quad (\text{Eq.42})$$

Balanç tèrmic:

$$Q_{CHP} = Q_{CCHP} - Q_{ad} = Q + Q_{hw} + \frac{C - C'}{COP_a} - Q_{ad} \quad (\text{Eq.43})$$

Per tal d'operar en aquest mode, el sistema s'estructura com indica la figura 3.10.



**Figura 3.10:** Mode autònom

Font: elaboració pròpia

L'elecció d'un mode d'operació haurà de ser presa tenint en consideració les característiques de l'edifici o vivenda sobre el qual treballi el sistema. Tot i així, generalment, el mode d'igualació de calor acostuma a ser el més econòmic per a sistemes de trigeneració industrial i en edificis encara que sigui el que utilitzi més combustible.

## 4. Sistemes mCCHP basats en energies renovables

### 4.1. Energia primària en sistemes energètics en edificis

#### 4.1.1. Sistemes de microcogeneració

Els sistemes de microcogeneració es poden dividir en tres categories diferents:

- Sistemes de generació de microcalor

Es componen de bombes de calor (amb font d'aigua, aire o terra), biomassa o panells solars tèrmics.

- Sistemes de generació de microelectricitat

Es componen de panells fotovoltaics, microturbines de vent o estacions microhídriques.

- Sistemes de microgeneració combinada de calor i electricitat (sistemes mCCHP o sistemes de cogeneració)

Es componen de motors de combustió interna, motors Stirling o cèl·lules de combustible.

Els sistemes de microgeneració poden fer servir combustibles fòssils, fonts d'energia renovables o una combinació de tots dos com a font d'energia primària.

El disseny més utilitzat en sistemes microCCHP consta d'un motor de combustió interna modificat per funcionar amb gas connectat a un generador elèctric. Aquest tipus de sistemes no s'acostumen a fer servir per a ús domèstic ja que ocupen molt espai i són bastant sorollosos.

Els sistemes microCCHP basats en un motor Stirling són els més adients per al subministrament d'electricitat i calor en edificis ja que no tenen una mida molt gran ni fan molt soroll. Els motors Stirling funcionen a partir de la transferència de calor d'una font externa que produeix calor. Aquesta font calenta pot ser una combustió externa originada per un combustible o pot ser fins i tot una font d'energia solar.

### 4.2. Energia solar

L'energia solar és una font d'energia renovable que consisteix en l'aprofitament de la radiació electromagnètica provinent del Sol. Aquesta radiació és aprofitable a tots els punts de la superfície terrestre tot i que no tindrà la mateixa intensitat en tots ells.

Quan es parla de radiació solar és convenient diferenciar els termes irradiància i irradiació. La irradiància s'utilitza per quantificar la densitat de potència, és a dir, és la potència solar rebuda per unitat de superfície i es mesura en  $\text{W/m}^2$ . Per una altra banda, la irradiació s'utilitza per quantificar la densitat d'energia, és a dir, és la energia solar rebuda per unitat de superfície en un determinat interval de temps i es mesura en  $\text{Wh/m}^2$ . La irradiació és l'exposició a la radiació i és una integral de temps de la irradiància. La irradiància global mitjana és de  $170 \text{ W/m}^2$ .

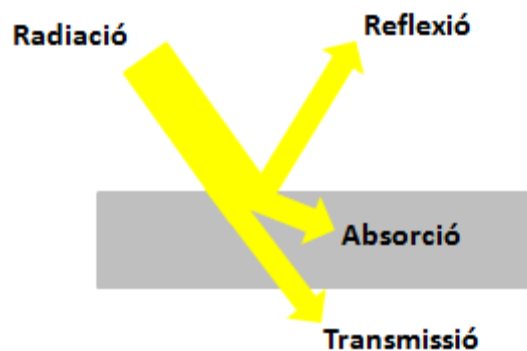
El potencial d'energia solar en un punt determinat dependrà de la latitud en la que es trobi, de l'hora del dia i també de les condicions climàtiques locals com l'aparició de núvols. De manera secundària dependrà també de la temperatura de l'aire.

#### 4.2.1. Principi de conversió de l'energia solar

El Sol emet fotons cap a la terra que tenen diferents nivells energètics dependent de la seva longitud d'ona de manera que com més petita sigui la longitud d'ona d'un fotó més energia tindrà aquest. La irradiació solar es compon de fotons amb diferents energies.

Quan un fotó completa el seu camí des de la superfície del Sol cap a la superfície terrestre es produeix una transferència d'energia entre ells que pot ser completa o no. El procés que té lloc quan el fotó transfereix tota la seva energia a la superfície s'anomena absorció. Si el material amb el qual impacta no absorbeix completament el fotó es produeix l'efecte de transmissió o bé el de reflexió. Quan té lloc la transmissió, el fotó passa a través del material, en canvi si el fotó rebotja contra la superfície del material parlem de reflexió.

Quan es produeixen els fenòmens de transmissió o reflexió però el fotó surt amb una direcció arbitrària respecte a la direcció d'incidència es parla del fenomen de dispersió.



**Figura 4.1:** Reacció de la radiació solar al impactar en una superfície

Font: elaboració pròpia

La transferència energètica entre un fotó i la superfície amb la que impacta pot comportar diferents efectes en el material:

- L'energia transferida al material fa augmentar l'energia cinètica dels seus àtoms

Quan té lloc el procés d'absorció, l'energia radiant es pot convertir en calor traduint-se en un increment de la temperatura del material. Aquesta conversió tèrmica és la forma d'aprofitament de l'energia solar més antiga i utilitzada. Qualsevol cos negre exposat a la radiació solar la transforma en calor. Aquestes superfícies actuen com a col·lectors solar tèrmics plans i es fan servir per escalfar aigua a les llars.

- L'energia transferida al material provoca un canvi en l'estat intern dels seus àtoms

Aquest procés porta a l'obtenció d'energia elèctrica a partir de l'energia solar, de manera que, a partir de la influència de la radiació solar en un material es genera una tensió elèctrica, el



que s'anomena efecte fotoelèctric. Aquest efecte es produeix gràcies a la descàrrega de càrregues elèctriques negatives i positives (electrons i forats) en un material sòlid (cèl·lula fotovoltaica) a arrel de la seva il·luminació. Aquesta polarització elèctrica del material de la cèl·lula fotovoltaica origina una tensió elèctrica que pot ser utilitzada per a fer circular un corrent en un circuit tancat. Les cèl·lules fotovoltaïques produeixen molt poca energia elèctrica per si soles, per tant, mitjançant la seva associació ja sigui en sèrie o en paral·lel es formen panells fotovoltaics que si són capaços de subministrar una quantitat d'energia elèctrica raonable.

Els panells fotovoltaics s'utilitzen molt en habitatges ja que no necessiten gairebé manteniment, no contaminen el medi ni emeten soroll i la tecnologia fotovoltaica més utilitzada avui dia són els materials cristal·lins de silicó.

#### **4.2.2. Rendiments en la conversió d'energia solar**

Per avaluar el rendiment de qualsevol procés de conversió d'energia és necessari conèixer els valors de l'energia primària que entra al sistema i de l'energia que es produeix. Per a un sistema que transforma energia solar és necessari conèixer la irradiació solar horitzontal diària (H) que es defineix com la irradiació d'energia solar que arriba a una superfície horitzontal d' $1 \text{ m}^2$  en el període de temps d'un dia, així com l'energia elèctrica o tèrmica que produeixi el sistema.

Per conèixer la irradiació solar horitzontal diària en un punt determinat és necessari consultar les dades estadístiques disponibles per al punt per tal d'aproximar el seu valor.

El rendiment de la conversió d'energia en el cas d'un panell solar tèrmic és del 70% aproximadament mentre que per als panells fotovoltaics és del voltant del 15%.

#### **4.2.3. Emmagatzematge d'energia solar**

L'energia provinent del Sol es pot emmagatzemar de dues maneres diferents: l'emmagatzemament d'energia elèctrica i l'emmagatzemament d'energia tèrmica.

##### **- Emmagatzematge d'energia elèctrica**

Els sistemes fotovoltaics només produeixen electricitat durant les hores de Sol i en diverses ocasions això presenta un gran inconvenient. Per exemple, en els sistemes fotovoltaics dissenyats per edificis o vivendes, l'hora pic de consum de cada dia es situa al voltant de les 20:00 quan el sistema no és capaç de produir gairebé electricitat. La generació fotovoltaica és un fenomen fàcil de preveure ja que sempre té el seu pic de producció cap al migdia, i tot i que pot variar suaument sempre hi ha unes vuit hores entre el pic de producció i el pic de demanda. La solució a aquesta falta de concordança entre producció i demanda passa per incloure un element capaç d'emmagatzemar l'energia per a fer-la servir posteriorment.

Aquest element d'emmagatzemament d'energia elèctrica pot tindre diferents papers dintre del sistema de subministrament:

- L'emmagatzematge pot actuar com un recurs d'energia distribuïda (DER) al proporcionar electricitat.
- El canvi d'energia de les energies renovables variables (VRE) augmenta el factor de capacitat del sistema desplaçant l'excés de producció del moment on es produeix al moment en el que hi ha una mancança.
- L'emmagatzematge pot suavitzar les corbes de càrrega i permetre així al consumidor canviar les seves càrregues pic. Aquest fenomen es coneix com arbitratge o anivellació de càrrega i fa que el dispositiu d'emmagatzematge es carregui durant les hores de menor activitat i es descarregui durant les hores pic.

#### - **Emmagatzematge d'energia tèrmica**

L'estudi de les necessitats d'ACS i de calefacció en un habitatge o edifici ajuda a determinar la demanda de calor necessària. Quan es genera calor a partir de la radiació solar es produeix un desfasament entre la producció i la demanda de calor ja que no sempre es consumeix l'energia tèrmica en el moment en el que es produeix. Aquesta falta de sincronització es suavitza amb l'ús de sistemes d'emmagatzematge de calor.

Els sistemes d'emmagatzematge d'energia tèrmica emmagatzemen la calor de diferents maneres en dipòsits aïllats per a la seva posterior utilització en calefacció, refredament o producció d'aigua calenta.

Existeixen diferents tecnologies destinades a l'emmagatzematge tèrmic:

##### - Emmagatzematge de calor sensible

És una de les tecnologies més extenses i el medi d'emmagatzematge que fa servir pot ser líquid (com aigua o oli tèrmic) o sòlid (com formigó o el terra). L'energia tèrmica s'emmagatzema únicament a través d'un canvi de temperatura del medi d'emmagatzematge.

La capacitat del sistema d'emmagatzematge ve donada per la capacitat calorífica específica i la massa del medi emprat.

##### - Emmagatzematge de calor latent

Es basa en la utilització de materials amb canvi de fase com a medi d'emmagatzemament. Aquests materials poden ser orgànics com és el cas de la parafina o inorgànics com els hidrats de sal. La calor latent o calor amagada és l'energia intercanviada durant el canvi de fase i durant la transferència d'energia la temperatura no varia. Aquest sistema és molt eficient ja que permet l'emmagatzematge de grans quantitats de calor en volums petits i amb un canvi de temperatura mínim.

##### - Emmagatzematge termoquímic per absorció o adsorció

Els sistemes de sorció (absorció o adsorció) funcionen com a bombes de calor termodinàmic quan treballen en buit. La calor provinent d'una font a alta temperatura escalfa un adsorbidor i

el vapor és desorbit d'aquest adsorbent i condensat a baixa temperatura en un condensador. La calor de condensació és retirat del sistema.

L'adsorbent sec i el fluid de treball separat es pot emmagatzemar tant temps com es vulgui. Durant el procés de descàrrega, el fluid de treball assoleix una temperatura baixa a l'evaporador. Tot seguit, el vapor del fluid de treball s'adsorbeix i s'allibera la calor de l'adsorció a altes temperatures que poden arribar fins als 200°C depenent de l'adsorbent i dels fluids de treball i la densitat d'energia pot arribar a ser tres cops major que la de l'emmagatzematge per calor sensible amb aigua. Aquests tipus de sistemes són més cars ja que són més complexes però per a l'emmagatzematge d'energia tèrmica per aplicacions residencials amb tancs d'aigua són la tecnologia més estesa.

### 4.3. Biomassa

La biomassa és la utilització de la matèria orgànica com a font d'energia i pot venir de diversos orígens. En termes globals és l'energia solar acumulada al sòl en forma de matèria animal o vegetal.

Es considera biomassa tota aquella fracció biodegradable de productes, o residus d'origen biològic, de l'agricultura, forestal i indústries relacionades, inclosa la pesca i l'aqüicultura, així com la fracció biodegradable dels residus d'indústries i municipis.

El terme bioenergia o energia de la biomassa fa referència a tot aquell combustible derivat de la biomassa ja sigui sòlid, líquid o gasós. Les tecnologies actuals permeten transformar aquestes formes de biomassa en calor, electricitat i biocombustibles per al transport.

Pel que fa a la emissió de gasos d'efecte hivernacle, la biomassa és considerada una font d'energia neutra. Això és degut a que al cremar la biomassa s'allibera a l'atmosfera el carboni que aquesta conté en forma de CO<sub>2</sub> però, en un principi, la formació d'aquesta matèria vegetal que la forma a partir de la fotosíntesi ja va consumir CO<sub>2</sub> i les emissions queden compensades.

#### 4.3.1. Fonts i tecnologies de la biomassa

Les fonts de biomassa que es fan servir per a la generació d'electricitat són les següents:

- Biomassa sòlida

Aquesta forma de biomassa necessita d'un tractament mecànic previ per convertir-la en encenalls de fusta, pelets, briquetes, palla o fems secs entre d'altres i es poden fer servir com a combustible en les plantes de carbó convencionals. Aquesta opció és més econòmica ja que la inversió que implica és baixa i el rendiment és pràcticament el mateix que fent servir combustibles fòssils.

Aquests tipus de combustibles també es poden fer servir com a font d'energia primària per a sistemes de cogeneració al cremar-los dins de les calderes que aquests poden integrar. D'aquesta manera s'obté un rendiment més alt a la conversió tot i que el rendiment elèctric és més baix i pugen els costos.

- Biogàs i biometà

Es generen en la digestió anaeròbica de la fracció biodegradable dels RSU, els llots de les aigües residuals, les fems, residus humits, restes d'aliments i microalgues i actuen com a substituents del gas natural per en la generació d'electricitat o la cogeneració. Els processos que utilitzen aquests gasos són força eficients i contaminen poc.

- Gas de síntesi

Es produeix a partir de la gasificació de biomassa lignocel·lulosa (fusta, palla, cultiu energètic, RSU) i es fa servir per a la generació d'electricitat i com a substitut del gas natural.

- Productes de piròlisi

Són el gas, el carbó vegetal i l'oli generats per la piròlisi de la biomassa lignocel·lulosa i es fa servir per a la generació d'electricitat i com a substitut del gas natural.

Les millors formes de generar calor a partir de biomassa són les següents:

- Combustió de pelets o briquetes de fusta o troncs

Es duu a terme en sistemes de calefacció especialitzats a petita escala. Cal dissenyar aquests sistemes per tal que tinguin una emissió de gasos controlada fet que comporta una inversió alta.

- Combustió de pelets

Es duu a terme en calderes automatitzades per sistemes de calefacció a petita escala.

- Combustió d'encenalls de fusta

Es duu a terme en calderes per sistemes de calefacció grans com per exemple habitatges multifamiliars.

- Combustió de biomassa sòlida, productes piròlisi o gas de síntesi

Es duu a terme en calderes per sistemes de calefacció urbana amb cogeneració i té un rendiment alt alhora d'una baixa emissió de gasos d'efecte hivernacle.

#### **4.3.2. Combustió de biofuel**

Hi ha diferents factors que afecten al procés de combustió del biofuel com la composició, el contingut d'humitat i el valor calorífic de la biomassa així com els paràmetres d'operació: temperatura, temps, estequiometria i turbulència de la combustió.

El rendiment d'aquest procés depèn del tipus de combustible, de l'excés d'aire en la combustió i de la temperatura dels gasos d'escapament.

#### **4.4. Unitats de cogeneració basades en motors Stirling**

El funcionament dels motors Stirling es basa en la propietat d'expandir-se i contraure's que presenten els gasos com a resposta al seu escalfament o refredament.

Es componen d'un cilindre tancat hermèticament i ple de gas (heli normalment) pel qual es mouen dos pistons. Un extrem del cilindre és escalfat per un cremador mentre que l'altre és refredat per aigua provinent del circuit de l'edifici.

Els tipus de motors Stirling utilitzats en sistemes de cogeneració per edificis són els cinemàtics i els de pistó lliure.

Els motors cinemàtics són models d'acció simple de 90° amb dos cilindres en V.

Als motors de pistó lliure, el gas es va desplaçant de la part freda a la calenta per l'acció d'un dels pistons, el que provoca el moviment de l'altre pistó a causa d'una diferència de pressió i que serà el que s'acobra al generador elèctric.

Els generadors elèctrics que accionen els motors Stirling són de tipus asíncron i s'acoblen directament al voltant de 1.500 rpm i 50Hz.

El rendiment de la conversió d'energia mecànica en energia elèctrica en els motors Stirling es situa entre el 15 i el 30%, tot i així, el rendiment total d'un sistema de microcogeneració basat en un motor Stirling és d'entre un 80 i un 90%.

## 4.5. Calderes

Les calderes són aparells capaços de produir aigua calenta o vapor a través de la calor provinent d'una combustió o d'un resistor elèctric.

Quan la calor s'obté a partir de la crema d'un combustible es fa a partir de dos processos. Primer es transforma l'energia química del combustible en calor a partir del seu cremat i, per tant, s'originen gasos d'alta temperatura. L'altre procés consisteix en la transferència de calor entre aquest gasos i l'aigua o el vapor a través de la superfície de la caldera de manera que la caldera actua com a un intercanviador de calor des d'un punt de vista funcional.

Per un sistema que faci servir una caldera, les característiques del combustible que faci servir, la demanda tèrmica que hagi d'abastir i els requeriments sobre els nivells de contaminació emesos determinaran una mida i una configuració determinades per a la caldera.

Les calderes que produeixen aigua calenta es classifiquen en dos tipus segons la temperatura a la que l'escalfen. Trobem les que l'escalfen fins a una temperatura màxima de 115°C (no s'evapora ja que no treballen entre 2 i 10 bars) i les que ho fan fins a una temperatura superior a 115°C treballant a pressions entre 6 i 15 bars.

Les calderes que produeixen vapor ho fan a pressions per sobre de l'atmosfèrica.

Per a una caldera, el rendiment tèrmic es defineix com la relació entre la potència tèrmica útil produïda i la potència tèrmica consumida i pren valors per sobre del 90% quan aquesta funciona

amb combustibles líquids o gasosos i amb temperatures dels gasos de la combustió d'entre 150 i 180°C.

$$\eta (\%) = \frac{Q_u}{B \cdot LHV} \cdot 100 \quad (\text{Eq.44})$$

On:

$\eta$  és el rendiment tèrmic de la caldera

$Q_u$  és la potència calorífica útil produïda en kW

$B$  és el caudal de combustible en kg/s o en Nm<sup>3</sup>/s

$LHV$  és el valor d'escalfament mínim del combustible en kJ/kg o en kJ/Nm<sup>3</sup>

## 4.6. Col·lectors solars tèrmics

Els col·lectors solars tèrmics són aparells que absorbeixen la radiació solar i la converteixen en calor que serà transferida a un fluid (aigua, aire o oli) que circula a través seu. La calor que transmet aquest fluid s'utilitza per a calefacció en edificis, escalfament d'aigua o producció d'energia elèctrica.

Aquests panells es classifiquen segons la seva mobilitat i temperatura d'operació:

Mobilitat	Tipus de col·lector	Tipus d'absorbidor	Relació de concentració	Rang de temperatures (°C)
Estacionari	De plat pla	Nivell pla	1	30-80
	Amb tubs d'evacuació	Nivell pla	1	50-200
	De nivell compost fet de ranures parabòliques	Tubular	1-5	60-240

**Taula 4.1:** Classificació dels col·lectors solars tèrmics

Els dos tipus de col·lector bàsics són els col·lectors de concentració i els col·lectors sense concentració o de plat pla. Els col·lectors de concentració acostumen a tenir un sistema de seguiment de la llum solar i una superfície còncava que reflecteix la llum en una superfície absorbent més petita que rep la radiació de diversos col·lectors. La relació entre la superfície d'incidència i la de l'absorbent s'anomena relació de concentració. Els col·lectors sense concentració, en canvi, comparteixen la mateixa superfície per rebre la radiació solar que per absorbir-la.

## Col·lectors de plat pla

Els col·lectors solars tèrmics de plat pla s'utilitzen a llocs càlids i solejats ja que veuen reduït considerablement el seu rendiment en condicions de fred, vent o nuvolositat. El seu rendiment també es veu afectat pel deteriorament dels col·lectors que pot causar la condensació de la humitat de l'aire dins dels seus tubs. Actualment, aquests inconvenients es poden suavitzar fent servir col·lectors amb tubs evacuats que consisteixen en un tub de metall (absorbidor) recobert per un altre de vidre sobre el mateix eix i entre els quals es fa el buit. L'aigua circula pel tub de dins. Aquest buit no comporta pèrdues de calor per conducció ni convecció i tampoc pateix els efectes de la humitat de l'aire. L'inconvenient que té aquesta tecnologia és que té un cost més elevat però aquests col·lectors assoleixen temperatures més altes que els de plat pla i per tant tenen un rendiment més elevat.

## Col·lectors de concentració

Els col·lectors de concentració es componen de miralls que concentren la radiació solar en un receptor que actua com a absorbidor. Són capaços d'assolir temperatures més altes que els col·lectors de plat pla tot i que només concentren la radiació solar directa i s'utilitzen sovint en zones amb molta irradiància (a prop de l'Equador). Els concentradors funcionen de manera més eficient quan disposen de sistemes de seguiment de la radiació solar de tal manera que a mesura que l'angle d'incidència de la llum solar canvia amb els temps els miralls es reorientin per captar la màxima radiació possible. Aquests sistemes poden ser d'un sol eix, movent-se només d'est a oest o de dos eixos movent-se a més a més de nord a sud.

Avantatges	Desavantatges
Tenen un rendiment termodinàmic més alt ja que el fluid de treball assoleix temperatures més elevades	Aprofiten menys radiació difusa en comparació a la seva relació de concentració
Tenen un rendiment tèrmic més elevat ja que tenen pèrdues de calor més baixes	Necessiten sistemes d'orientació
La superfície de reflexió necessita menys material i té una estructura més simple	Necessiten manteniment a la superfície per no veure reduïda la seva capacitat de reflexió

**Taula 4.2:** Avantatges i desavantatges dels col·lectors solars de concentració

Per una altra banda, també existeixen els anomenats col·lectors termofotovoltaics que converteixen l'energia solar en calor i electricitat de manera simultània. Consisteixen en un mòdul fotovoltaic amb un absorbidor al darrere que permet la refrigeració del mòdul que augmentarà la seva eficiència i a més aprofita aquest calor per a l'escalfament d'aigua. El mòdul fotovoltaic produeix electricitat amb un rendiment d'entre el 5 i el 20%. Encara que els rendiments elèctrics i tèrmics d'aquests col·lectors híbrids són inferiors als dels mòduls fotovoltaics i els col·lectors solars tèrmics per separat, si que són més alts que els que s'obtidrien al col·locar tots dos aparells per separat en un mateix espai, per tant, són molt útils quan es disposa d'una superfície de captació limitada. Aquests col·lectors poden ser plans o de concentració i treballar amb aire o amb aigua.

#### 4.6.1. Rendiment dels col·lectors solars tèrmics

El rendiment tèrmic d'un col·lector solar ve donat per la següent expressió:

$$\eta = \eta_0 - k_1 \frac{T_i - T_a}{H} - k_2 \cdot \frac{(T_i - T_a)^2}{H} \quad (\text{Eq.45})$$

On:

$\eta$  és el rendiment tèrmic del col·lector

$T_i$  és la temperatura del fluid d'entrada

$T_a$  és la temperatura ambient

$H$  és la irradiància en  $\text{W/m}^2$

$\eta_0$  és el rendiment òptic (rendiment del col·lector quan la temperatura mitjana és igual a la temperatura ambient)

$k_1$  i  $k_2$  són els coeficients de pèrdua de calor

La potència de sortida que proporciona un col·lector solar tèrmic es calcula amb la següent expressió:

$$\dot{Q}_{ST} = A_{ST} \cdot \eta_{ST} \cdot H \quad (\text{Eq.46})$$

On:

$\dot{Q}_{ST}$  és la potència de sortida del col·lector en W

$\eta_{ST}$  és el rendiment del col·lector en %

$A_{ST}$  és l'àrea del col·lector en  $\text{m}^2$

$H$  és la irradiància a la superfície del captador en  $\text{W/m}^2$

#### 4.7. Panells Fotovoltaics

La potència elèctrica generada per una cèl·lula fotovoltaica és el producte del corrent imposat per la càrrega que se li connecta i el voltatge de la pròpia cèl·lula. Aquesta potència serà nul·la quan la cèl·lula es trobi en curtcircuit, ja que el voltatge serà zero i quan es trobi en circuit obert ja que, en aquest cas, el corrent serà zero. Per una altra banda, el punt on la potència assoleix el seu valor màxim es dona en les coordenades:  $V=V_{\text{max}}$  i  $I=I_{\text{max}}$ .



Les característiques tècniques que defineixen una cèl·lula fotovoltaica són les següents:

- $V_{oc}$ : voltatge de circuit obert

És el voltatge màxim disponible a la cèl·lula fotovoltaica i té lloc quan el corrent que circula a través seu és nul.

- $I_{sc}$ : Intensitat de curtcircuit

És el corrent màxim disponible a la cèl·lula fotovoltaica i té lloc quan el voltatge en els seus terminals és zero.

- $V_{max}$ : Tensió al punt d'operació òptim
- $I_{max}$ : Corrent al punt d'operació òptim
- $P_{max}$ : Potència màxima disponible (al punt d'operació òptim)
- FF: factor d'ompliment

Aquest paràmetre determina la qualitat de la cèl·lula fotovoltaica i es defineix com la relació entre la potència màxima de la cèl·lula i el producte del seu voltatge a circuit obert amb la seva intensitat de curtcircuit. Gràficament, el factor d'ompliment és l'àrea del rectangle més gran possible comprès sobre la corba I-V.

$$FF = \frac{V_{max} I_{max}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (\text{Eq.47})$$

- Coeficient de modificació de la potència amb la temperatura de la cèl·lula

El rendiment de la conversió d'energia que es duu a terme en una cèl·lula fotovoltaica és la relació entre la potència màxima que és capaç de subministrar i la que rep per acció de la llum incident:

$$\eta(\%) = \frac{V_{max} I_{max}}{P_{in}} \cdot 100 = FF \cdot \frac{V_{oc} I_{sc}}{H \cdot A} \cdot 100 \quad (\text{Eq.48})$$

On:

$\eta$  és el rendiment de la cèl·lula

$P_{in}$  és la potència rebuda per la radiació solar

H és la irradiància en  $\text{kW/m}^2$

A és la superfície de la cèl·lula en  $\text{m}^2$

Les cèl·lules fotovoltaïques tenen la capacitat de produir una potència elèctrica de  $300 \text{ W/m}^2$  però al estar encapsulades dins de mòduls fotovoltaics la superfície útil per a la generació d'electricitat serà inferior a la que realment ocupen els mòduls.

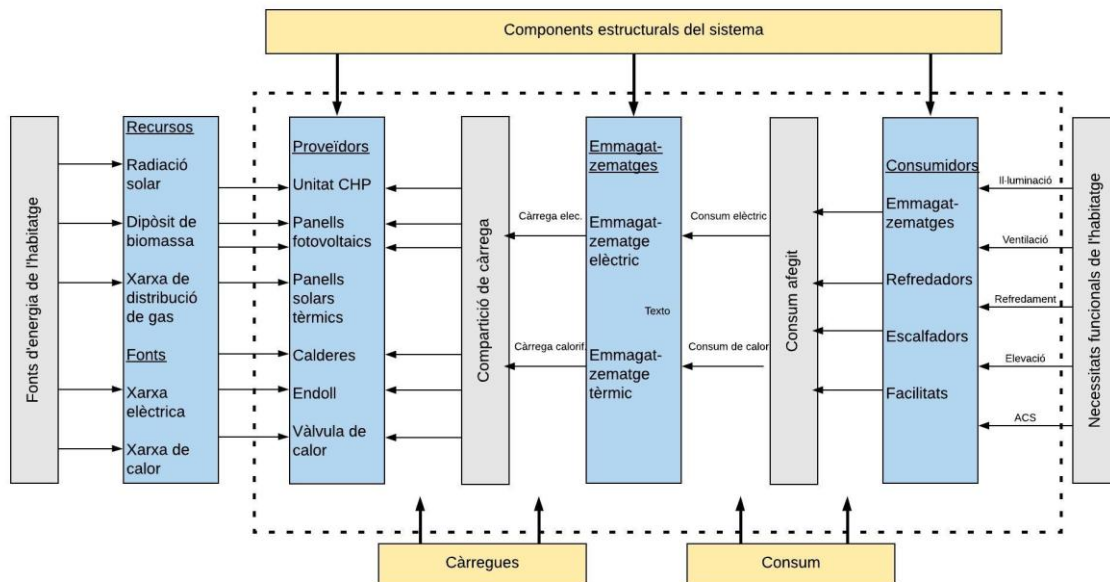
## 5. Disseny estructural de sistemes mCCHP-RES

El disseny estructural és la primera etapa de l'algorisme del procés de disseny d'aquest tipus de sistemes i consta de set passos: El marc de treball conceptual, el pla de negoci del fabricant, la recollida de dades inicial, el model estructural general, l'estimació del consum, l'estimació de càrrega i la selecció del model estructural. A partir d'aquests passos es completa la primera etapa del procés de disseny i s'obté un conjunt de models estructurals acceptables que seran l'entrada de la segona etapa del procés de disseny; el disseny funcional.

### 5.1. Marc de treball conceptual

El marc de treball conceptual és el primer pas alhora de dissenyar sistemes energètics i consisteix en la delimitació de l'espai de cerca que és aquell espai en el qual es busquen les solucions als problemes que sorgeixen durant el procés de disseny. Cada tipus de problema representa una dimensió en aquest espai i cada restricció a complir alhora de satisfer un tipus de problema representa una limitació d'aquesta dimensió. Aquestes limitacions delimiten l'espai de cerca i, ja que l'espai de cerca representa un marc de treball conceptual, els problemes han de ser estratègics.

Per exemple, un problema estratègic pot ser l'arquitectura d'un sistema mCCHP i una solució és l'esquema estructural de la figura 5.1.



**Figura 5.1:** Esquema estructural dels sistemes mCCHP

Font: elaboració pròpia

### 5.1.1. Esquema conceptual del sistema

El sistema mCCHP representat a la figura anterior presenta com a entrada l'anomenat ambient energètic de l'habitatge que consta de dos conjunts de característiques. Un conjunt fa referència a l'estructura i el potencial de les fonts d'energia de les que es disposen a la ubicació de l'habitatge. Aquestes són de tipus primàries com el Sol, la fusta, la xarxa de gas... que poden ser renovables o no renovables o de tipus secundaries com la xarxa elèctrica i la de calor. L'altre conjunt de característiques fa referència a l'intercanvi energètic potencial que té lloc entre l'habitatge i el medi.

La sortida del sistema passa per satisfer les necessitats funcionals de l'habitatge com il·luminació, aire condicionat, calefacció, cuina... per tal d'obtenir la comoditat desitjada en l'habitatge.

El sistema mCCHP actua com a interfície energètica entre el medi on es situa l'habitatge i el medi en el que viuen els ocupants de l'habitatge, de tal manera que es serveix del medi de l'habitatge per a crear el medi per a la vida en ell.

L'energia del sistema s'obté dels equipaments domèstics que actuen com a consumidors. La quantitat d'energia que utilitzen aquests consumidors durant un període de temps és el consum de l'habitatge.

A més a més, el sistema necessita d'un conjunt d'elements estructurals de suport per tal d'encendre els consumidors. Aquests elements de suport generen energia a partir de les fonts d'energia disponibles i/o a partir de la seva connexió a la xarxa de subministrament ja sigui per agafar energia d'aquesta o per proporcionar-la. La càrrega és la quantitat d'energia útil que transmeten els elements de suport, ja siguin generadors o la pròpia xarxa durant un cert període de temps en un sentit o un altre.

El punt òptim de treball del sistema passa per fer coincidir el consum i la càrrega per tal de no malbaratar energia. Això no és sempre possible i, per tant de mitigar les diferències entre els seus valors el sistema disposa de dos elements estructurals addicionals: els sistemes d'emmagatzematge elèctric i els sistemes d'emmagatzematge tèrmic. Tot i que aquests sistemes són capaços de mitigar desequilibris menors, els desequilibris de major magnitud s'han de mitigar fent ús de sistemes de control.

### 5.1.2. Procediment

El procés de disseny d'un sistema mCCHP per a un edifici o habitatge es compon del següent procediment

#### Formulació del problema

Primer cal establir la hipòtesi del problema fent una estimació de les necessitats energètiques de la vivenda i identificant les fonts d'energia disponibles a la zona on està situada la vivenda.

La conclusió del problema passa per identificar quins requeriments té l'habitatge i determinar les actuacions que caldrà seguir.

També és necessari establir les variables del problema per mitjà de la identificació d'aquelles característiques del sistema que afecten a la relació entre la hipòtesi i la conclusió. Aquestes característiques seran variables independents de la funció objectiu del sistema. Les variables dependents de la funció objectiu del sistema seran aquelles que ressaltin aspectes essencials de l'explotació del sistema.

### **Elaboració del model estructural general del sistema**

A partir de la informació obtinguda a l'etapa anterior s'estructura conceptualment el conjunt del sistema a partir de dos subsistemes energètics: l'elèctric i el tèrmic.

### **Identificació dels models estructurals del sistema**

Consisteix en la formulació matemàtica dels balanços energètics del model general estructural i en la selecció d'un conjunt de models estructurals.

### **Elaboració dels models funcionals del sistema**

Es completa amb elements auxiliars l'estructura de cada conjunt energètic per a cada model estructural i es dimensionen aquests components.

### **Establiment dels models de control del sistema**

Els models de control potencials s'elaboren de tal manera que facin ús del potencial elèctric de l'acumulador (voltatge de la bateria) i del potencial tèrmic del dipòsit de calor (temperatura de l'agent tèrmic) com a variables de control ja que serveixen com a indicadors dels desequilibris entre l'energia produïda i l'energia consumida. Si l'energia produïda és inferior a la consumida els potencials elèctric i tèrmics decreixen i si és superior creixen. D'aquesta manera, el sistema de control és l'encarregat de mantenir aquestes variables de control dins dels seus valors de referència mitjançant l'ajust de l'energia produïda aconseguint així l'equilibri entre producció i demanda.

### **Modelització i simulació de l'operació del sistema en mode dinàmic**

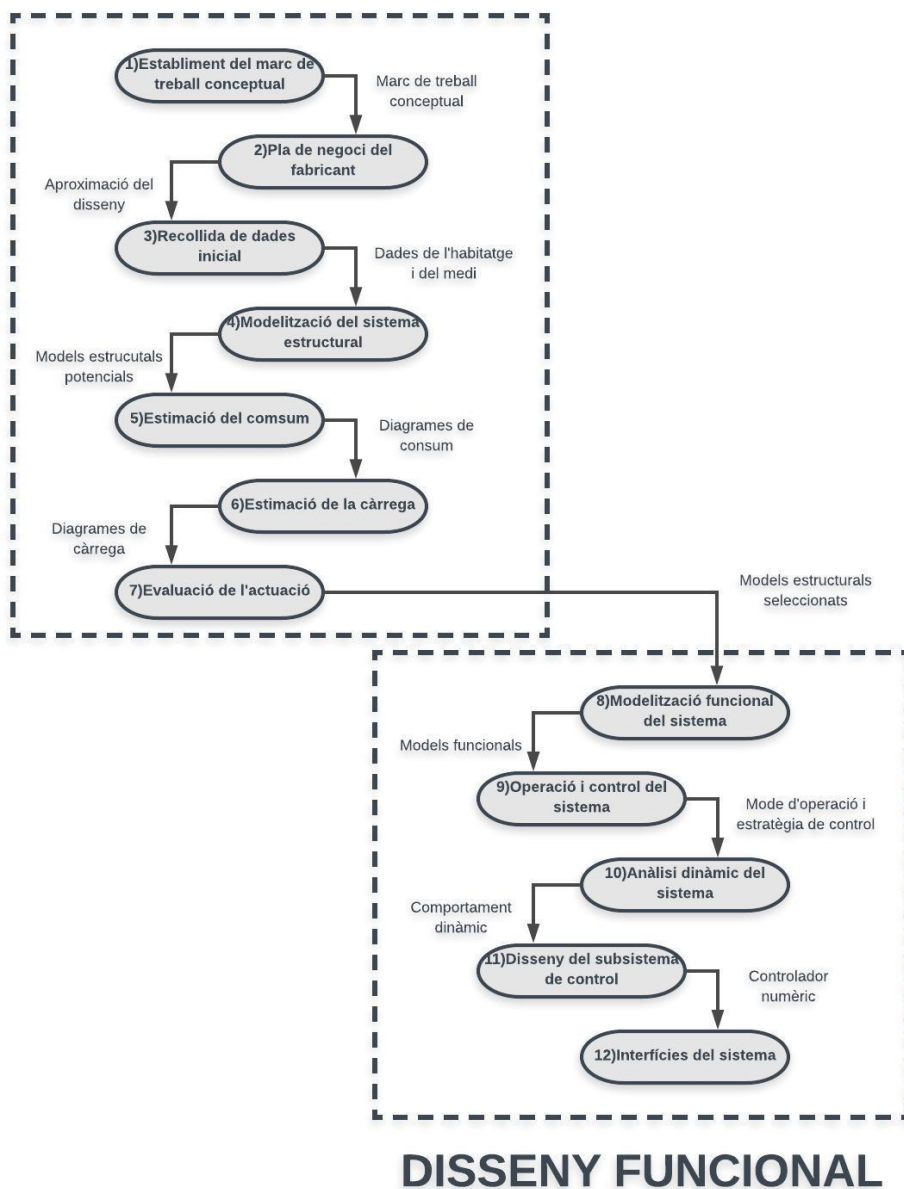
Finalment, la modelització i simulació de l'operació del sistema es pot realitzar mitjançant models simplificats dinàmics de les fonts d'energia com calderes o motors Stirling ja que tenen el seu propi sistema de control.

D'aquesta manera es pot comprovar si els valors nominals de sortida dels components (establerts durant l'etapa d'elaboració de models funcionals i considerats satisfactoris per a l'operació del sistema operant en mode estacionari) són adients en mode dinàmic i es poden ajustar si no ho són.

### 5.1.3. Procés de disseny

El procés a seguir per al disseny d'un sistema mCCHP es divideix en dues grans etapes cadascuna composta per diversos passos: el disseny estructural i el disseny funcional.

## DISSENY ESTRUCTURAL



**Figura 5.2:** Esquema del procés de disseny

Font: elaboració pròpia

## 5.2. Pla de negoci del fabricant

Un fabricant de sistemes mCCHP pot optar entre dos plans de negoci diferents a seguir. El primer pla de negoci consisteix en la producció i comercialització de sistemes mCCHP per a ús general per tant han de ser sistemes dissenyats per poder adaptar-se el més fàcilment possible als diferents habitatges.

El segon pla de negoci consisteix en la producció i comercialització de diferents components d'ús general i la seva implantació en un sistema dedicat a la residència del client.

## 5.3. Presa de dades inicial

Aquesta tercera etapa en el disseny d'un sistema mCCHP es basa en la recollida d'una sèrie de dades que proporcionin informació sobre:

- **Característiques de l'habitatge**

Les dades necessàries sobre l'habitatge han de fer referència a les seves característiques geomètriques i funcionals ja que tenen influència en el consum energètic. Concretament, cal conèixer la localització de l'habitatge (latitud i longitud) i la seva ubicació dins de l'àrea urbanitzada de la ciutat o no. Pel que fa a la informació sobre els elements característics de l'arquitectura cal conèixer:

Superfície de la planta baixa (GFA) i superfície total del sòl (TFA)

Estructura, superfície i materials del mur exterior

Superfície, tipus, orientació i estructura de les finestres

Superfície escalfada

Alçada mitjana de l'espai escalfat

Perímetre

Estat d'alçada de l'habitatge i forma de l'edifici

- **Necessitats i requisits del consumidor**

Aquestes necessitats fan referència a les funcions de l'habitatge, l'espai ocupat pel sistema mCCHP, i als costos relacionats amb la compra i l'operació del sistema

- **Necessitats funcionals de l'habitatge**

En un habitatge o un edifici s'utilitza energia per a diversos usos. Els més comuns són la calefacció i la refrigeració, la ventilació, la il·luminació o l'escalfament d'aigua, sent la climatització l'acció que consumeix més energia.

L'ocupant o els ocupants de l'habitatge tenen una gran influència en el consum total que tindrà la vivenda ja que el determinaran segons els seus hàbits. De la mateixa manera, el propietari haurà d'escollir els sistemes de suport per a calefacció, refrigeració i electricitat tenint en compte factors com el cost d'aquests, els seus ingressos o el preu de l'electricitat. Sovint, com més ingressos tingui el propietari serà més probable que compri equips amb un major consum o com més cara sigui l'electricitat més probable serà que opti per comprar equips de major eficiència.

- **Entorn energètic de l'habitatge**

Fa referència a les dades sobre el clima i les fonts i els recursos energètics de la zona en la qual està construïda l'habitatge.

**Clima local:**

El consum d'un habitatge està influenciat tant per factors interns com externs. Els factors interns venen donats per les característiques d'aquest mentre que els externs estan afectats per les condicions climàtiques de la zona on es situa l'habitatge. Aquests aspectes climàtics són la temperatura de l'aire, la velocitat del vent, la intensitat de la llum solar i la humitat de l'aire.

La temperatura exterior és el factor amb major influència en el consum ja que d'ella dependrà en gran part el consum tèrmic tant en curts com en llargs períodes de temps. A més a més, la quantitat d'energia tèrmica necessària per a la calefacció també ve afectada per la quantitat de radiació solar rebuda i pel vent. L'entrada de calor extern en l'habitatge depèn principalment de la radiació solar que entra a través de les finestres i està també influenciada per la ventilació natural segons la pressió que exerceix el vent.

La informació que cal obtenir es compon de valors estadístics anuals dels paràmetres climàtics per a certs períodes de temps (dia, mes, estació i any):

- Temperatura mitjana anual fora de la casa
- Temperatura mitjana diària exterior
- Temperatura mitjana diària interior
- Temperatura mitjana durant els mesos calents
- Radiació solar
- Nombre de graus-dia de calefacció o refrigeració (HDD o CDD)
- Humitat relativa
- Velocitat del vent

La temperatura mitjana diària exterior ( $\vartheta_{e,i}$ ) serveix tant per calcular la durada de l'estació de calefacció com la temperatura mitjana durant aquesta ( $\vartheta_{e,hs}$ ) i el nombre de graus-dia d'escalfament.

La durada de l'estació de calefacció en dies es calcula amb la següent expressió:

$$d_{hs} = \sum_i d_i \quad \text{per} \quad \vartheta_{e,i} \leq \vartheta_i \quad (\text{Eq.49})$$

On:

$d_{hs}$  és la durada de l'estació de calefacció en dies

$\vartheta_{e,i}$  és la temperatura mitjana del medi extern per a cada dia

$\vartheta_b$  és la temperatura base o del punt de balanç i té un valor estàndard de 12°C

La temperatura mitjana durant la temporada de calefacció es calcula amb la següent expressió:

$$\vartheta_{e,hs} = \frac{\sum_1^{365} \vartheta_{e,i}}{d_{hs}} \quad \text{per} \quad \vartheta_{e,i} \leq \vartheta_i \quad (\text{Eq.50})$$

On:

$\vartheta_{e,hs}$  és la temperatura mitjana durant la temporada de calefacció

$d_{hs}$  és la durada de l'estació de calefacció en dies

$\vartheta_i$  és la temperatura interior i té un valor estàndard de 20°C

La irradiància solar durant la temporada de calefacció es calcula amb la següent expressió:

$$H_{solar} = \frac{\sum_i H_{solar,i}}{d_{hs}} \quad \text{per} \quad \vartheta_{e,i} \leq \vartheta_b \quad (\text{Eq.51})$$

On:

$H_{solar,i}$  es la irradiància solar per cada metre quadrat durant la temporada de calefacció

$d_{hs}$  és la durada de l'estació de calefacció en dies

$\vartheta_b$  és la temperatura base o del punt de balanç i té un valor estàndard de 12°C

El nombre de graus-dia és un paràmetre climàtic que indica la intensitat i la durada tant del temps calent com del temps fred que consisteix en la suma amb el temps de la diferència entre la temperatura exterior i la temperatura base que es pren com a referència. La definició més bàsica per al nombre de graus-dia és la diferència entre aquesta temperatura base i la mitjana diària de la temperatura exterior.

Els graus-dia de calefacció (HDD) serveixen per mesurar la durada i la intensitat del temps fred mentre que els graus dia de refredament (CDD) prenen les mateixes dades del temps calent.

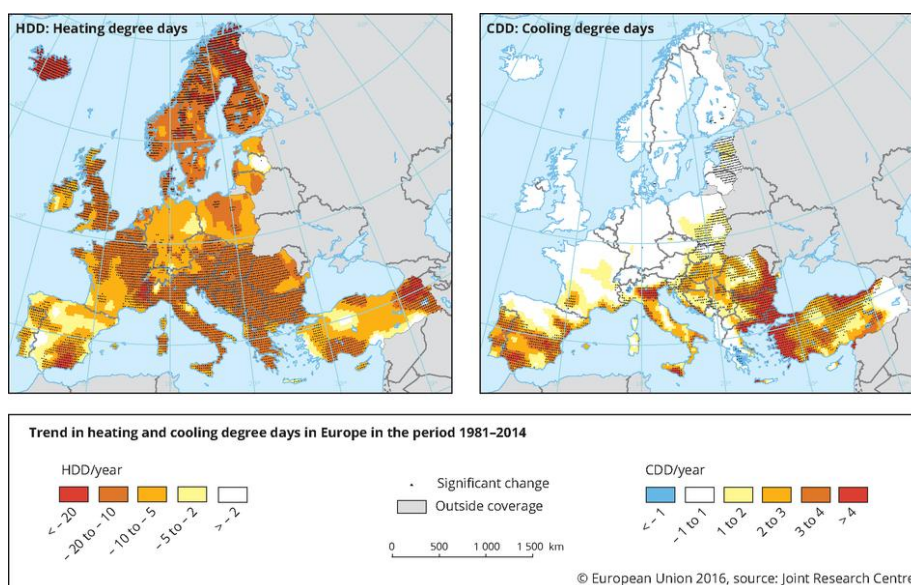


D'aquesta manera, com més fred sigui el temps en un mes donat més gran serà el valor del CDD per aquell mes.

En un habitatge escalfat durant l'estació freda es perd calor quan aquest s'allibera cap al medi extern. Una part d'aquest calor perdut es substitueix per guanys de calor casuals provinents de la gent, els llums, el Sol que entra per les finestres o els aparells de la casa entre d'altres però la majoria d'aquest calor es substitueix pel que proporciona el sistema de calefacció.

Gràcies en part a aquests guanys casuals, hi haurà certs moments amb unes temperatures exteriors prou elevades on els guanys casuals igualin les pèrdues de temperatura i no sigui necessari fer funcionar els sistemes de calefacció. La temperatura mínima a partir de la qual s'aconsegueix aquesta igualtat serà la temperatura base per a un determinat habitatge. Els graus-dia de calefacció serveixen per mesurar la quantitat de temps durant la qual la temperatura exterior cau per sota de la temperatura base. Són la suma de les diferències entre la temperatura exterior i la temperatura base quan la exterior és inferior:

$$HDD = \sum_{dia} (\vartheta_b - \vartheta_{e,i}) \quad per \quad \vartheta_b \geq \vartheta_{e,i} \quad [^{\circ}C \text{ dia}] \quad (\text{Eq.52})$$



**Figura 5.3:** Mapa dels HDD i els CDD  
Font: European Environment Agency [9]

Els graus-dia de calefacció també serveixen per calcular la calor anual necessària per a un habitatge i la quantitat de combustible necessari per calefacció: Demanda energètica per calefacció (kWh) = coeficient de pèrdues per calor global (kW/°C) · HDD (°C dia) · 24 (h/dia). De la mateixa manera, els graus-dia de refrigeració es fan servir per calcular el consum energètic anual per refrigeració. La temperatura base per a un habitatge amb sistema de

refrigeració és aquella temperatura exterior per sota de la qual no cal fer funcionar aquest equip i està relacionada amb els guanys en calor a l'habitatge. Els graus-dia de refrigeració guarden relació amb la diferència de temperatura respecte a la base.

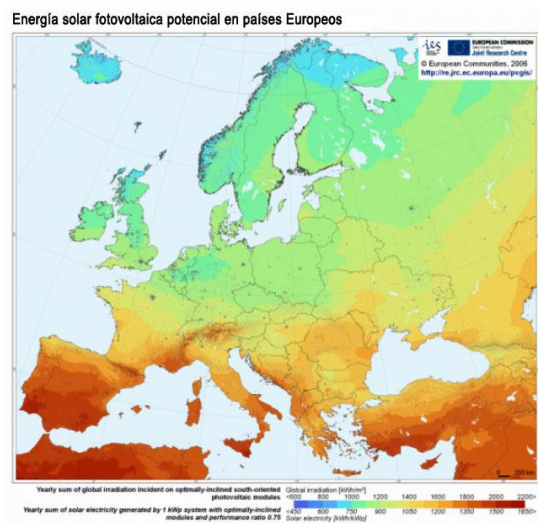
Els sistemes de refrigeració han de mantenir una temperatura a l'interior de l'habitatge de 22°C quan la temperatura a l'aire lliure no excedeix els 29°C. Quan puja per sobre d'aquest valor, la temperatura interior comença a variar mantenint una diferència de 7°C per sota de la temperatura a l'aire lliure.

#### Fonts i recursos energètics locals:

El recurs energètic disponible en habitatges i aprofitable per els sistemes mCCHP per excel·lència és l'energia solar. Aquesta energia s'aprofita tant per mitja de panells fotovoltaics com per mitjà de panells solars tèrmics. Tots dos tipus de panells es col·loquen o bé al terra o bé a l'edifici o casa amb les limitacions arquitectòniques que es poden presentar, per això cal parlar de potencial solar del territori i de potencial solar de l'habitatge.

#### Potencial solar del territori europeu

La quantitat d'energia solar que es pot aprofitar en territori europeu per cada metre quadrat de superfície es troba entre 800 i 1.6500 kWh/m<sup>2</sup>any segons la situació geogràfica. El potencial total al nord-oest d'Europa és de 100 kWh/m<sup>2</sup>any aproximadament repartits més o menys al 50% entre radiació directa i difusa i d'uns 2.000 kWh/m<sup>2</sup>any aproximadament al sud d'Europa.



**Figura 5.4:** mapa del potencial solar a Europa

Font: PVGIS [9]

La inclinació òptima és l'angle al qual una superfície col·locada de cara al sud rep la màxima quantitat possible d'irradiància total anual i depèn de la latitud, sent per exemple de 48° a Oslo (59°55' nord) o de 23° a Atenes (36°57' nord).

La potència nominal de sortida d'un mòdul fotovoltaic d'1 kW en condicions de test estàndards (1.000 W/m<sup>2</sup> d'irradiància i 25°C de temperatura del mòdul) ve donada en kilovats pic (kWp)

#### Potencial solar d'un edifici o habitatge

La instal·lació de panells solars tèrmics o fotovoltaics depèn de les característiques dels edificis o habitatges als que subministren i es pot fer en terrats, al terra o integrant-los a la seva superfície. Alhora d'instal·lar-los també s'ha d'escollir una zona en la qual no els cobreixi l'ombra i s'han d'orientar al sud. Aquestes característiques són més difícils de complir pels panells integrats en edificis ja estan limitats pels seus terrats o façanes i a més tenen elements com finestres que entorpeixen o no permeten la seva col·locació.

El factor d'ús ( $k$ ) és la relació entre l'àrea dels panells ( $A_{PV}$ ,  $A_{ST}$  o  $A_{PANELS}=A_{PV}+A_{ST}$ ) i l'àrea de terra utilitzada ( $A_{GFA}$ ). Les notacions de  $k$  i d'aquestes àrees estan completades amb índexs que dependran del tipus de panells i la seva localització (terrats o façanes).

Per cada metre quadrat d'edifici hi ha de mitjana 0,4 m<sup>2</sup> de superfície de terrat i 0,15m<sup>2</sup> de superfície de façana amb un bon potencial solar, per tant:

$$k_{terrat} \leq 0,4 \quad i \quad k_{façana} \leq 0,15 \quad (\text{Eq.53})$$

(Eq.54)

Es considera bo un rendiment solar ( $Y$ ) en un edifici o habitatge a partir del 80% de l'energia solar anual màxima rebuda definit per separat per terrats i façanes inclinats i individualment per a cada localització.

- Metodologia per a l'avaluació del potencial energètic solar d'un edifici o habitatge:

Tal i com queda establert a la fase de disseny estructural el mes serà la unitat bàsica de temps i per a un mateix mes els valors de les variables romandran constants així que per a obtenir el valor diari o anual de qualsevol variable es divideix el valor mensual entre el nombre de dies per mes o es multiplica pel nombre de mesos per any.

Un cop conegudes les característiques de l'habitatge i dels panells es poden calcular els següents paràmetres mensuals:

	Producció d'electricitat	Producció de calor
Global	$E$	$Q$
En proporció a la superfície de la planta baixa (GFA)	$E$	$Q$
En proporció a la superfície total (TFA)	$e_{PV}$	$q_{ST}$

**Taula 5.1:** nomenclatura de paràmetres

$$E = E_{\text{terrat}} + E_{\text{façana}} \quad \text{en kWh/mes} \quad (\text{Eq.55})$$

$$Q = Q_{\text{terrat}} + Q_{\text{façana}} \quad \text{en kWh/mes} \quad (\text{Eq.56})$$

Terrats en relació a l'àrea de la planta baixa (GFA):

$$E_{\text{terrat}} = k_{\text{terrat},PV} \cdot A_{GFA} \cdot Y_{\text{terrat}} \cdot \eta_e \cdot H \cdot N_{\text{dies}} = e_{\text{terrat}} \cdot A_{GFA} \quad \text{en kWh/mes} \quad (\text{Eq.57})$$

$$Q_{\text{terrat}} = k_{\text{terrat},ST} \cdot A_{GFA} \cdot Y_{\text{terrat}} \cdot \eta_t \cdot H \cdot N_{\text{dies}} = q_{\text{terrat}} \cdot A_{GFA} \quad \text{en kWh/mes} \quad (\text{Eq.58})$$

$$e_{\text{terrat}} = k_{\text{terrat},PV} \cdot Y_{\text{terrat}} \cdot \eta_e \cdot H \cdot N_{\text{dies}} \quad \text{en kWh/m}_{GFA}^2/\text{mes} \quad (\text{Eq.59})$$

$$q_{\text{terrat}} = k_{\text{terrat},ST} \cdot Y_{\text{terrat}} \cdot \eta_t \cdot H \cdot N_{\text{dies}} \quad \text{en kWh/m}_{GFA}^2/\text{mes} \quad (\text{Eq.60})$$

Façanes en relació a l'àrea de la planta baixa (GFA):

$$E_{\text{façana}} = k_{\text{façana},PV} \cdot A_{GFA} \cdot Y_{\text{façana}} \cdot \eta_e \cdot H \cdot N_{\text{dies}} = e_{\text{façana}} \cdot A_{GFA} \quad \text{en kWh/mes} \quad (\text{Eq.61})$$

$$Q_{\text{façana}} = k_{\text{façana},ST} \cdot A_{GFA} \cdot Y_{\text{façana}} \cdot \eta_t \cdot H \cdot N_{\text{dies}} = q_{\text{façana}} \cdot A_{GFA} \quad \text{en kWh/mes} \quad (\text{Eq.62})$$

$$e_{\text{façana}} = k_{\text{façana},PV} \cdot Y_{\text{façana}} \cdot \eta_e \cdot H \cdot N_{\text{dies}} \quad \text{en kWh/m}_{GFA}^2/\text{mes} \quad (\text{Eq.63})$$

$$q_{\text{façana}} = k_{\text{façana},ST} \cdot Y_{\text{façana}} \cdot \eta_t \cdot H \cdot N_{\text{dies}} \quad \text{en kWh/m}_{GFA}^2/\text{mes} \quad (\text{Eq.64})$$

Producció mensual de calor i electricitat dels panells en relació a l'àrea de la planta baixa (GFA):

$$e = e_{\text{terrat}} + e_{\text{façana}} \quad \text{en kWh/m}_{GFA}^2/\text{mes} \quad (\text{Eq.65})$$

$$q = q_{\text{terrat}} + q_{\text{façana}} \quad \text{en kWh/m}_{GFA}^2/\text{mes} \quad (\text{Eq.66})$$

Terrats en relació a la superfície dels panells:

$$e_{\text{terrat},PV} = Y_{\text{terrat}} \cdot \eta_e \cdot H \cdot N_{\text{dies}} \quad \text{en kWh/m}_{PV}^2/\text{mes} \quad (\text{Eq.67})$$

$$q_{\text{terrat},ST} = Y_{\text{terrat}} \cdot \eta_t \cdot H \cdot N_{\text{dies}} \quad \text{en kWh/m}_{ST}^2/\text{mes} \quad (\text{Eq.68})$$

Façanes en relació a la superfície dels panells:

$$e_{\text{façana},PV} = Y_{\text{façana}} \cdot \eta_e \cdot H \cdot N_{\text{dies}} \quad \text{en kWh/m}_{PV}^2/\text{mes} \quad (\text{Eq.69})$$

$$q_{\text{façana},ST} = Y_{\text{façana}} \cdot \eta_t \cdot H \cdot N_{\text{dies}} \quad \text{en kWh/m}_{ST}^2/\text{mes} \quad (\text{Eq.70})$$

També existeixen les següents relacions entre els components  $e_{PV}$  i  $q_{ST}$  de la producció específica dels panells relativa a la TFA i els components  $e_{\text{terrat},PV}$ ,  $e_{\text{façana},PV}$ ,  $q_{\text{terrat},ST}$  i  $q_{\text{façana},ST}$ :

$$e_{PV} = e_{\text{terrat},PV} \cdot \frac{A_{\text{terrat},PV}}{A_{TFA}} + e_{\text{façana},PV} \cdot \frac{A_{\text{façana},PV}}{A_{TFA}} \quad (\text{Eq.71})$$

$$q_{ST} = q_{\text{terrat},ST} \cdot \frac{A_{\text{terrat},ST}}{A_{TFA}} + q_{\text{façana},ST} \cdot \frac{A_{\text{façana},ST}}{A_{TFA}} \quad (\text{Eq.72})$$

On:

$A_{\text{terrat},PV}$  i  $A_{\text{façana},PV}$  són les àrees dels panells fotovoltaics del terrat i la façana respectivament en  $\text{m}^2$

$A_{\text{terrat},ST}$  i  $A_{\text{façana},ST}$  són les àrees dels panells solars tèrmics del terrat i la façana respectivament en  $\text{m}^2$

$A_{GFA}$  és l'àrea de la planta baixa en  $\text{m}^2$

$A_{TFA}$  és l'àrea conjunta de totes les plantes en  $\text{m}^2$

$\eta_e$  i  $\eta_t$  són les eficiències generals dels panells fotovoltaics i solars tèrmics respectivament

$H$  és la irradiància rebuda mensualment per cada  $\text{m}^2$  de superfície en  $\text{kWh/m}^2$

$N_{\text{dies}}$  és el nombre de dies del mes en qüestió

$Y_{\text{terrat}}$  i  $Y_{\text{façana}}$  són els rendiments solars per els terrats i façanes respectivament calculats com la mitjana entre totes les orientacions

$e_r$  i  $e_f$  són la producció d'energia elèctrica mensual dels terrats i façanes respectivament en  $\text{kWh/m}_{GFA}^2$

$q_r$  i  $q_f$  són la producció d'energia tèrmica mensual dels terrats i façanes respectivament en  $\text{kWh/m}_{GFA}^2$

$e_{PV}$  i  $q_{ST}$  són la producció d'energia elèctrica i tèrmica mensual dels panells fotovoltaics i solars tèrmics respectivament en  $\text{kWh/m}_{TFA}^2/\text{mes}$

$e_{\text{terrat},PV}$  i  $q_{\text{terrat},ST}$  són la producció d'energia elèctrica i tèrmica mensual dels panells instal·lats al terrat en  $\text{kWh/m}_{PV}^2/\text{mes}$  i  $\text{kWh/m}_{ST}^2/\text{mes}$  respectivament

$e_{\text{façana,PV}}$  i  $q_{\text{façana,ST}}$  són la producció d'energia elèctrica i tèrmica mensual dels panells instal·lats a la façana en kWh/m<sup>2</sup><sub>PV</sub>/mes i kWh/m<sup>2</sup><sub>ST</sub>/mes respectivament

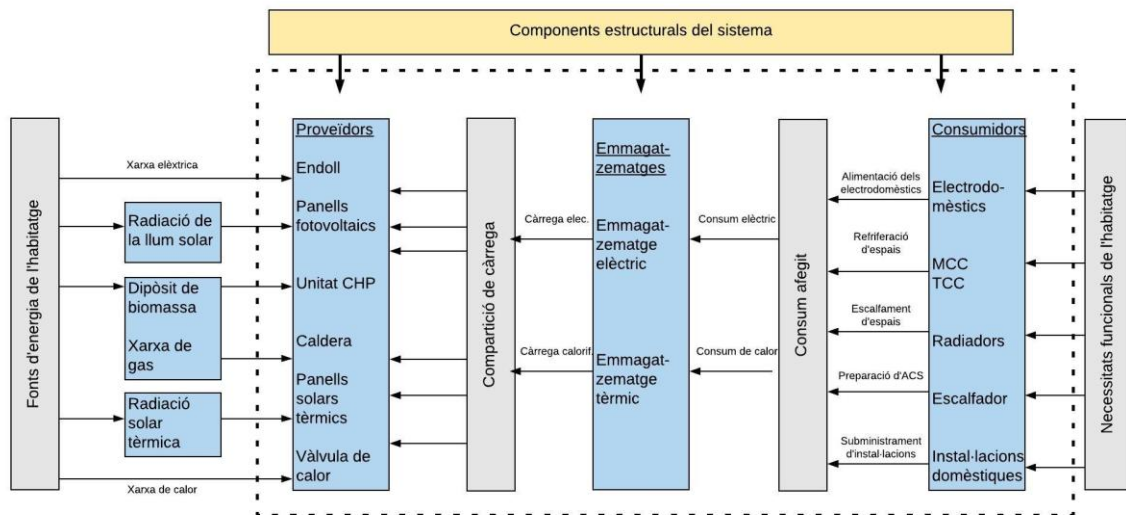
Finalment, si els valors dels factors d'ús són màxims i satisfan les limitacions enunciades anteriorment, la producció global i específica representen el potencial energètic de l'edifici. Si els seus valors satisfan les limitacions i corresponen als panells instal·lats, la producció global i específica representa la plena càrrega dels panells.

## 5.4. Modelització estructural de sistemes

### 5.4.1. Construcció del model general estructural

En aquesta etapa del procés de disseny es duen a terme dues accions per tal de desenvolupar un conjunt de possibles models estructurals del sistema.

La primera acció consisteix en la construcció del model general estructural del sistema a partir de la personalització de l'esquema estructural genèric i la informació obtinguda a les etapes prèvies. La segona acció consisteix en definir un conjunt de models estructurals potencials per al sistema. Tot model estructural està caracteritzat per dues característiques del sistema: la seva estructura i la seva integració en el medi energètic. La figura 5.5 mostra en mostra un exemple:



**Figura 5.5:** Exemple de model estructural d'un sistema mCCHP

Font: elaboració pròpia

### 5.4.2. Identificació dels models estructurals potencials

L'establiment de models estructurals potencials per a un model estructural general donat depèn de l'estratègia d'estructuració i integració del sistema.

L'estratègia d'estructuració del sistema fa referència al tipus de components que utilitza mentre que l'estratègia d'integració del sistema en el seu medi energètic fa referència a l'habilitat del sistema per connectar-se tant a les xarxes energètiques com als recursos energètics primaris. Segons si el sistema rep energia de les xarxes o la subministra poden donar-se diferents casos. Els més típics són:

- L'estratègia de no connexió a la xarxa durant la qual no es produeix cap intercanvi d'energia entre els sistemes i les xarxes.
- L'estratègia de connexió a la xarxa durant la qual es transfereix energia entre les xarxes i els sistemes en qualsevol sentit.

## 5.5. Estimació del consum

Per a un sistema energètic el consum fa referència a la forma i la quantitat d'energia que gasta per unitat de temps.

Aquest consum es pot estimar a nivell de l'ús final o a nivell de residència on pot ser global o específic. Es parla de consum global a nivell de residència quan es fa referència a tot l'habitatge. En canvi, quan es divideix el consum global entre l'àrea total de la planta (TFA) s'obté el consum específic.

El consum s'estima per a cada forma d'energia utilitzada i per a cada funció coberta a l'habitatge. Les formes d'energia podrien ser calor i electricitat mentre que les funcions cobertes podrien ser calefacció, refrigeració, escalfament d'aigua o alimentació d'instal·lacions domèstiques. L'avaluació del consum de l'habitatge segons la forma d'energia s'anomena agregació del consum.

## 5.6. Estimació analítica del consum de calor i de fred

Les influències diàries i les variacions anuals en el consum d'energia tèrmica d'un habitatge venen donades principalment per la temperatura externa a la que està sotmès.

Cal mantenir la temperatura a les habitacions ( $\vartheta_i$ ) entre els 19 i els 21 °C per tal d'assegurar el confort al seu inferior. Per a tal motiu, com més baixa sigui la temperatura a l'exterior de l'habitatge, més alta serà la demanda d'energia tèrmica. Una temperatura de l'aire confortable depèn de la humitat, el flux de radiació rebut i la velocitat del vent així com de la roba que porti la persona que es troba al lloc en qüestió, el seu metabolisme i el seu estil de vida.

És necessari construir un medi amb una temperatura adient a dins de l'edifici o habitatge fent servir el mínim de calefacció o refrigeració artificial possible tot i quan la temperatura ambiental externa ( $\vartheta_e$ ) no ho sigui.

El nivell de consum energètic residencial per calefacció depèn de la construcció i els materials usats en l'edifici o habitatge independentment de la localització d'aquest. El balanç de calor al seu

interior tenint en compte l'entrada d'energia tèrmica amb origen solar ve donada per la següent expressió:

$$mc \frac{d\vartheta_i}{dt} = \tau \alpha G A + P_a - \frac{\vartheta_i - \vartheta_e}{R_w} \quad (\text{Eq.73})$$

$$R_w = \frac{1}{\lambda} \frac{\delta}{A} \quad (\text{Eq.74})$$

On:

m és la massa construïda de l'edifici (parets i terres interiors) en kg

c és la capacitat específica del material de les parets en Wh/kg°C

$\vartheta_i$  és la temperatura a les habitacions en °C

$\tau$  és la transmitància de l'edifici

$\alpha$  és l'absorbància de l'edifici

G és la irradiància en W/m<sup>2</sup>

A és la superfície en m<sup>2</sup>

$P_a$  és la potència de les fonts calefactores en W

$\vartheta_e$  és la temperatura externa en °C

$R_w$  és la resistència a les pèrdues de calor de les parets en °C/W

$\lambda$  és la conductivitat tèrmica de les parets

$\delta$  és el gruix de les parets

Per una altra part, la massa tèrmica dins de l'edifici pot absorbir calor durant el dia i alliberar-la durant la nit. Aquest fenomen redueix el sobreescalfament durant el dia i suavitza els canvis tèrmics entre dies i nits. La massa tèrmica és més eficaç quan guanya energia directament del Sol. Una massa tèrmica ideal per escalfar-se amb energia solar té una alta capacitat calorífica, una conductància i densitats moderades i una emissivitat alta.

La conductivitat tèrmica ( $\lambda$  o valor k) és una mesura estandarditzada que indica la facilitat amb la que flueix la calor a través d'una placa independentment del seu gruix i material i com més baix sigui el seu valor més alt serà el rendiment tèrmic. La conductivitat tèrmica permet comparar els rendiments tèrmics dels diferents tipus d'aïllants i s'expressa en W/mK.

Ahora de comparar dos aïllaments amb diferents gruixos i conductivitats tèrmiques cal calcular el valor R per metre quadrat amb la següent expressió:

$$\frac{\delta}{\lambda} = R_w \cdot A \quad (\text{Eq.75})$$

És una mesura de quant es redueixen les pèrdues de calor.



Aquesta nova relació permet obtenir una nova expressió per al balanç energètic a l'interior de l'habitatge:

$$mc \frac{d\vartheta_i}{dt} = A \left( \tau \alpha G + \frac{P_a}{A} - U(\vartheta_i - \vartheta_e) \right) \quad (\text{Eq.76})$$

$$U = \frac{1}{R_w A} = \frac{\delta}{\lambda} \quad (\text{Eq.77})$$

U mesura la quantitat de calor perduda a través d'un determinat gruix d'un material en particular incloent conducció, convecció i radiació. El valor d'U per a un material o conjunt de materials en sèrie es calcula prenent el recíproc del valor R i afegint les pèrdues per convecció i radiació. Com més baix sigui el valor d'U més alt serà el rendiment tèrmic.

La capacitat tèrmica dels elements de l'edifici endarrerix la transferència de calor al seu interior absorbint l'excés de calor durant les hores de Sol i alliberant-lo durant la nit per radiació i convecció. Les ones de calor tarden més en passar a través de les parets de l'habitatge com més gruixudes siguin aquestes i més resistents els seus materials. El factor de decrement indica la relació entre la reducció de la temperatura cíclica a la superfície a l'interior i a l'exterior de l'habitatge és a dir, el decrement en l'amplitud de la ona de calor.

Durant aquest procés de transmissió de calor a través de les parets, l'amplitud de l'ona que es propaga indica la temperatura i la longitud d'ona indica el temps. L'amplitud de l'ona de calor a la superfície exterior de la paret ve donada per la radiació solar i per la convecció entre aquesta superfície i l'aire ambient. L'amplitud va decreixent a mesura que es propaga per la paret dependent del gruix i el material de la paret.

La necessitat de calefacció i refrigeració en un habitatge es pot reduir amb l'increment del gruix de l'aïllament i amb l'ús de materials amb un valor d'U baix.

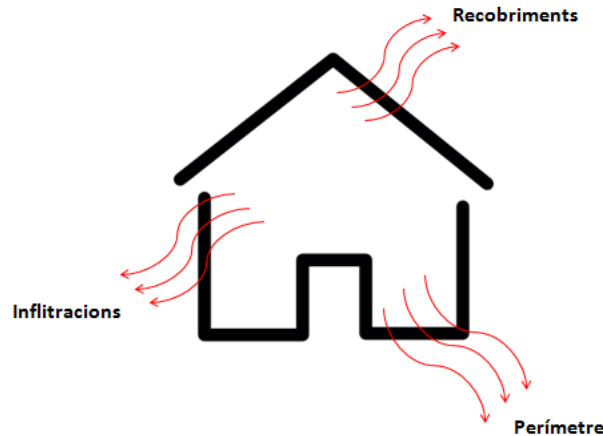
### 5.6.1. Estimació analítica basada en el coeficient de transferència de calor de l'habitatge

El rendiment tèrmic d'un edifici o habitatge fa referència al procés de modelització de la transferència d'energia que té amb el medi que l'envolta. Quan es tracta d'un edifici condicionat, el rendiment tèrmic estima la càrrega de calefacció i refrigeració, per tal de dimensionar l'equipament de calefacció, ventilació i aire condicionat. En canvi, per a un edifici no condicionat, calcula la variació de temperatura al seu interior en un interval de temps determinar i ajuda a estimar la duració dels períodes on la temperatura no és confortable.

Per al càlcul del rendiment tèrmic és important estimar el coeficient de transferència de calor d'un edifici o habitatge ja que tot allò que l'envolta afecta a la seva demanda de calefacció i refrigeració.

Càlcul de coeficient de transferència de calor global d'un edifici

El coeficient de pèrdua de calor d'un edifici (UA) es troba a partir identificant i ajuntant les diferents rutes de pèrdua de calor. La transferència de calor entre l'interior i l'exterior de l'edifici es produeix a través dels elements en contacte amb el seu entorn, de l'intercanvi d'aire entre l'interior i l'exterior (infiltració) i, segons com estigui acoblat amb l'edifici, del sòl.



**Figura 5.6:** Pèrdues de calor en un habitatge

Font: elaboració pròpia

L'alimentació de l'espai de calefacció ha de compensar les pèrdues de la calor transmesa a través de les parets i el sostre i les pèrdues produïdes per l'aire escalfat pels sistemes de ventilació.

La temperatura base ( $\vartheta_b$ ) es determina amb la següent expressió:

$$\dot{Q}_{perduda} = UA_{ref} (\vartheta_i - \vartheta_b) = \dot{Q}_{guanyada} \quad (\text{Eq.78})$$

$$\dot{Q}_{perduda} = \dot{Q}_{recobriment} + \dot{Q}_{canvisaire} + \dot{Q}_{perímetre} \quad (\text{Eq.79})$$

$$\dot{Q}_{recobriment} = UA_{recobriment} (\vartheta_i - \vartheta_e) - \text{Pèrdues al recobriment} \quad (\text{Eq.80})$$

$$\dot{Q}_{canvisaire} = UA_{canvisaire} (\vartheta_i - \vartheta_e) - \text{Pèrdues d'infiltració} \quad (\text{Eq.81})$$

$$\dot{Q}_{perímetre} = UA_{perímetre} (\vartheta_i - \vartheta_e) - \text{Pèrdues al perímetre} \quad (\text{Eq.82})$$

On:

$UA_{ref}$  és el coeficient de transferència de calor global de l'edifici en W/°C

$\vartheta_i$  és la temperatura interior amb un valor estàndard de 20°C

$\dot{Q}_{\text{perduda}}$  és la calor perduda de l'edifici

$\dot{Q}_{\text{guanyada}}$  és la calor generada a l'edifici i es determina amb la següent expressió:

$$\dot{Q}_{\text{guanyada}} = \dot{Q}_{\text{habitants}} + \dot{Q}_{\text{llums}} + \dot{Q}_{\text{equipaments}} \quad (\text{Eq.83})$$

La temperatura al punt d'equilibri es troba entre 19 i 21 °C a Europa i es calcula amb la següent expressió:

$$\vartheta_b = \vartheta_i - \frac{\dot{Q}_{\text{perduda}}}{UA_{\text{ref}}} \quad (\text{Eq.84})$$

La taxa de consum d'energia del sistema de calefacció és:

$$\dot{Q}_h = \frac{UA_{\text{ref}}}{\eta_h} (\vartheta_b - \vartheta_i) \quad (\text{Eq.85})$$

El consum energètic de disseny d'un edifici per a calefacció és:

$$\dot{Q}_{\text{disseny}} = \frac{UA_{\text{ref}}}{\eta_h} (\vartheta_i - \vartheta_e)_{\text{disseny}} \quad (\text{Eq.86})$$

Al comparar-lo amb el consum energètic anual s'obté la següent relació:

$$\frac{\dot{Q}_{\text{calefacció, anual}}}{\dot{Q}_{\text{disseny}}} = \frac{HDD}{(\vartheta_i - \vartheta_e)_{\text{disseny}}} \quad (\text{Eq.87})$$

On  $(\vartheta_i - \vartheta_e)_{\text{disseny}}$  és la diferència entre les temperatures interior i exterior de disseny.

La necessitat d'energia anual per a calefacció es pot calcular a través de la següent integral:

$$\dot{Q}_{calefacci\acute{o}, anual} = UA_{ref} \int (\vartheta_b - \vartheta_i) dt \simeq 0,0024 \cdot HDD \text{ en kWh/any} \quad (\text{Eq.88})$$

El consum de fred anual ( $Q_c$ ) es calcula de manera similar:

$$Q_c = 0,0024 \cdot UA_{ref} \cdot CDD \text{ en kWh/any} \quad (\text{Eq.89})$$

El coeficient de pèrdua de calor total de l'edifici es calcula amb la següent expressió:

$$UA_{ref} = UA_{recobriment} + UA_{canviaire} + UA_{per\acute{i}metre} \quad (\text{Eq.90})$$

La transferència de calor per conducció a través dels elements que recobreixen l'edifici (parets, terra, sostre, finestres...) ve donada per la següent expressió:

$$UA_{recobriment} = U \left[ \frac{W}{m^2 K} \right] \cdot A [m^2] \quad (\text{Eq.91})$$

Per calcular el coeficient de pèrdua de calor de l'edifici sencer cal consultar el valor U de cada element del recobriment de l'edifici a la taula 5.2, multiplicar-lo per l'àrea que ocupa i sumar-los tots.

Recobriments	U'_{max} [W/m²K] transmissió tèrmica màxima corregida amb la influència dels ponts tèrmics		U'_{max} [W/m²K] transmissió tèrmica màxima corregida amb la influència dels ponts tèrmics
	De nova construcció	Ja existents per ser renovats	De nova construcció (posterior a 1998)
Parets exteriors	0,57	0,71	0,71
Finestres exteriors	1,30	2,50	2,00
Terrasses	0,20	0,33	0,33
Sòls (amb soterranis sense calefacció)	0,35	0,60	0,60
Sòls (sense soterranis)	0,22	0,33	0,22
Sòls (amb soterranis escalfats)	0,21	0,24	0,20
Parets exteriors de soterranis escalfats	0,35	0,50	0,41

**Taula 5.2:** Valors U de referència en edificis residencials

Les infiltracions són intercanvis produïts a través de fuites, forats i ventilació que representen una pèrdua d'energia ja que faciliten l'entrada d'aire de l'exterior a una temperatura més

baixa i la sortida de l'aire interior. El coeficient de transferència de calor global per infiltració ve donat per la següent expressió:

$$UA_{canviaire} = VHC_{aire} \left[ \frac{W}{m^3 K} \right] \cdot V[m^3] \cdot ACH[no/h] \quad (\text{Eq.92})$$

On:

$VHC_{aire}$  és la capacitat de calor volumètrica de l'aire i és equivalent a la calor específica de l'aire o la seva capacitat per emmagatzemar energia en  $J/m^3 K$

$V$  és el volum interior de l'edifici en  $m^3$

$ACH$  són els canvis d'aire per hora estimats segons el gruix relatiu de l'edifici

La transferència de calor perimetral és aplicable a les cases en contacte directe amb el sòl a través de ciments. El coeficient global de transferència de calor és una funció de la llargada del perímetre en metres i la conductivitat tèrmica ( $F$ ) i ve donat per la següent expressió:

$$UA_{per\acute{im}etre} = F \left[ \frac{W}{mK} \right] \cdot P[m] \quad (\text{Eq.93})$$

#### Cerca del coeficient global de transferència de calor de l'edifici

Es fa a partir de tècniques d'inspecció termogràfica basades en càmeres infraroges.

La densitat del flux de calor entre dos medis en condicions estables separats per un mur es calcula a partir de la següent expressió:

$$\phi = U_W (\theta_i - \theta_e) \quad (\text{Eq.94})$$

On:

$\Phi$  és la densitat del flux de calor en  $W/m^2$

$U_W$  és el valor  $U$  del mur

$\theta_i$  i  $\theta_e$  són les temperatures interna i externa de l'aire en  $K$

També es pot expressar com a funció del coeficient de transferència de calor convectiu,  $h_{we}$  en  $W/m^2 K$  i de la diferència de temperatura entre la superfície externa del mur ( $\theta_{we}$ ) i la temperatura de l'aire a l'exterior  $\theta_e$ :

$$\phi = h_{we} (\theta_{we} - \theta_e) \quad (\text{Eq.95})$$

A partir de la combinació de les dues expressions anteriors es pot estimar el valor  $U$  del mur com a funció del coeficient  $h_{we}$ , les temperatures interna i externa de l'aire i la temperatura de la superfície exterior del mur:

$$U_w = h_{we} \frac{\theta_{we} - \theta_e}{(\theta_i - \theta_e)} \quad (\text{Eq.96})$$

Ja que aquesta transferència de calor mai es duu a terme realment en condicions estables i la temperatura de la superfície externa del mur pot estar afectada pel fenomen de la transmissió tèrmica per la inèrcia tèrmica, aquestes equacions són teòriques.

### 5.6.2. Estimació analítica basada en el coeficient d'aïllament tèrmic d'un edifici

El consum anual per calefacció d'un edifici en kWh/any ve donat per la següent expressió:

$$Q = 0,024 \frac{G \cdot V}{\eta_{calefacció}} HDD \quad (\text{Eq.97})$$

$$G = \frac{A}{R'_M V} + 0,34n$$

$$R'_M = \frac{A}{\sum \frac{A_j \cdot r_j}{R'_j}}$$

On:

$\eta_{calefacció}$  és el rendiment de l'aparell de calefacció

$V$  és el volum calent de l'edifici en  $m^3$

HDD són els graus-dia de calefacció

$G$  és el coeficient global d'aïllament tèrmic de l'edifici en  $W/m^3K$  i representa la suma de les pèrdues de calor resultants de la transmissió directa a través de l'àrea dels elements que recobreixen l'edifici per una diferència d'1 °K entre l'interior i l'exterior i en relació al volum de l'edifici que perd la calor a partir de la renovació de l'aire interior i de les infiltracions d'aire fred.

$A$  és l'àrea del recobriment de l'edifici en  $m^2$

$R'_M$  és la resistència tèrmica corregida mitjana del recobriment de l'edifici en  $m^2K/W$

$n$  és el nombre de canvis d'aire per hora en  $h^{-1}$

$A_j$  és l'àrea dels elements de construcció en  $m^2$

$\tau_j$  són els coeficients de correcció per els casos on les superfícies  $j$  no estan en contacte amb l'exterior

$R'_j$  són les resistències tèrmiques mitjanes corregides dels elements de construcció de tot l'edifici

El consum de fred anual ( $Q_c$ ) en kWh/any es calcula de manera semblant amb la següent expressió:

$$Q_c = 0,024 \frac{G \cdot V}{\eta_{\text{refrigeraci } \phi}} CDD \quad (\text{Eq.98})$$

On:

$\eta_{\text{refrigeració}}$  és el rendiment de l'aparell de refrigeració

$V$  és el volum calent de l'edifici en  $\text{m}^3$

$CDD$  són els graus-dia de refredament

## 5.7. Estimació analítica del consum de calor per ACS

El consum mitjà d'ACS s'estima de 50 litres diaris per persona.

La quantitat de calor consumit per la producció d'ACS en kWh assumint una diferència de  $50^\circ$  entre l'aigua freda i l'aigua calenta es determina a partir de la següent expressió:

$$Q_{ACS} = c_w \frac{m \cdot n \cdot N_d}{3.600} \Delta\vartheta \quad (\text{Eq.99})$$

On:

$Q_{ACS}$  és l'energia necessària per a la producció d'ACS

$c_w$  és la capacitat calorífica de l'aigua ( $4,187 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ )

$m$  és la quantitat d'aigua consumida diària en kg/persona

$n$  és el nombre d'habitants de l'edifici

$N_d$  és el nombre de dies

$\Delta\vartheta$  és la diferència de temperatura

## 5.8. Estimació analítica del consum energètic d'instal·lacions domèstiques

### 5.8.1. Procediment basat en l'estimació del consum global

L'energia total necessària per a la il·luminació d'un edifici o una habitació en kWh per a un cert període de temps ve donada per la següent expressió:

$$E_t = E_{L,t} + E_{p,t} \quad (\text{Eq.100})$$

On:

$E_{L,t}$  és l'energia consumida per les lluminàries durant el període t

$E_{p,t}$  és l'energia paràsita consumida pel circuit de càrrega de la il·luminació d'emergència i el sistema de control en espera de les lluminàries

L'energia és el producte de les potències instal·lades pel temps d'ús de la llum però, ja que es fa servir tota la potència instal·lada, per calcular l'energia cal fer ajustos fent servir els factors de dependència:

- El **factor de luminància constant (Fc)** està relacionat amb l'ús que es fa de la potència total instal·lada quan el control constant de luminància es troba en funcionament a l'habitació o edifici.
- El **factor de dependència d'ocupació (Fo)** relaciona l'ús de la potència d'il·luminació total instal·lada amb el període d'ocupació a l'habitació o edifici.
- El **factor de dependència de la llum solar (Fd)** relaciona l'ús de la potència d'il·luminació total instal·lada amb la disponibilitat de llum natural a l'habitació o edifici.
- El **factor d'absència (Fa)** fa referència al període on no hi ha ocupants a l'habitació o edifici. El seu valor és de 0,9 per al bany, 0,5 per al lavabo, 0,3 pel menjador i 0,2 per a la cuina.

La següent expressió estima l'energia d'il·luminació necessària per complir amb la funció d'enllumenament ( $E_{L,t}$ ) en kWh:

$$E_{L,t} = \frac{\sum(P_n \cdot F_C) \cdot [(t_D \cdot F_O \cdot F_D) + (t_N \cdot F_O)]}{1000} \quad (\text{Eq.101})$$

On:

$P_n = \sum P_i$  és la potència total instal·lada per il·luminació a l'habitació o edifici en W

$t_D$  representa el temps d'ús durant les hores de llum en hores



$t_N$  representa el temps d'ús durant les hores on no hi ha llum en hores. Les hores d'operació predeterminades són 250

La següent expressió estima l'energia parasitària ( $E_{p,t}$ ) necessària per proporcionar energia a l'enllumenat d'emergència i per a energia en espera pels controls d'il·luminació de l'habitació o edifici en kWh:

$$E_{p,t} = \frac{\sum [P_{pc} \cdot (t_y - t_D - t_N) + P_{em} \cdot t_e]}{1000} \quad (\text{Eq.102})$$

On:

$P_{pc}$  és la potència paràsita dels controls de l'habitació o edifici total instal·lada, és a dir, la potència d'entrada de tots els sistemes de control de l'enllumenat en W. Aquesta potència és una suma de la potència elèctrica de les fonts d'alimentació consumides pel circuit de càrrega de les lluminàries d'emergència i la potència en espera pels controls automàtics de les lluminàries quan no estan funcionant ( $P_{pc} = \sum P_{p,i}$ )

$t_y$  és el temps estàndard per any (8.760 h)

$P_{em}$  és la potència de càrrega de les lluminàries d'emergència de l'habitació o edifici, és a dir, la seva potència de càrrega d'entrada en W. És una suma de les potències d'entrada al circuit de càrrega de les lluminàries d'emergència ( $P_{ei}$ )

$t_o$  és el temps d'operació anual de les làmpades i lluminàries ( $t_o = t_D + t_N$ ) i té un valor predeterminat de 2.500 hores

$t_e$  és el temps de càrrega de la il·luminació d'emergència i representa les hores d'operació durant les que es carreguen les bateries de la il·luminació d'emergència

## 5.9. Estimació sintètica basada en el certificat energètic

### 5.9.1. Certificat energètic d'un edifici

És important que el certificat energètic d'un edifici mostri de forma clara un indicador global del seu consum energètic i, ja que aquest consum pot tenir diferents orígens (gas, electricitat, biomassa...), l'indicador serà la suma ponderada de les energies consumides.

Els certificats energètics han d'avaluar l'edifici en qüestió amb una classe energètica que anirà des d'A fins a G depenent del seu rendiment energètic i sent A el millor rendiment possible i G el pitjor.

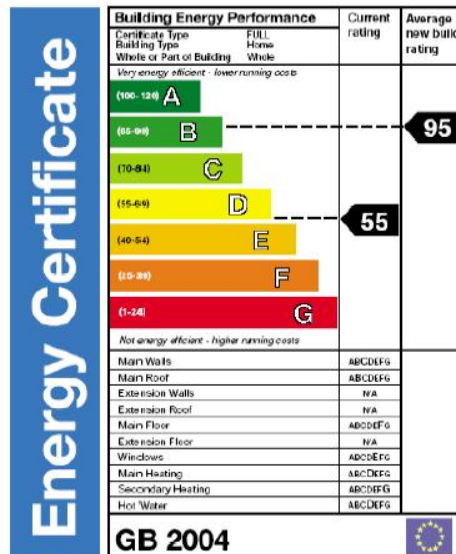


Figura 5.7: Certificat energètic

Font: ecoconsulting.net [8]

Els valors de referència establerts per aquests tipus de certificats seran diferents segons la funció de l'edifici. D'aquesta manera, es certificaran de diferent manera les cases unifamiliars que els blocs d'apartaments, els edificis d'oficines, els hospitals o els centres docents per exemple. Això és degut a que segons l'ús destinat a l'edifici caldrà proveir-lo de diferents serveis (calefacció, ACS, aire condicionat...), caldran diferents temperatures al seu interior, tindran diferents densitats d'ocupants o diferents horaris d'ocupació (5, 6 o 7 dies a la setmana).

### 5.9.2. Estimació del consum específic

La calor, el fred o la potència específica anuals per a un edifici s'obtenen a partir de la divisió del consum anual d'aquest entre l'àrea total del seu sòl TFA.

El consum global es pot avaluar en conjunt o per separat per a cada funció de l'edifici i en conjunt o per separat per a cada forma d'energia.

Pel que fa a l'energia específica d'un edifici, és necessari avaluar-la de forma mensual. Els càlculs comencen pels consums específics anuals de calor i fred i tenen com a objectiu trobar el consum específic mensual. El consum específic mensual es troba a partir dels graus-dia de calefacció i de refrigeració i es determina la calor i el fred consumits per unitat d'àrea (TFA) amb les següents expressions:

$$q_{h, \text{mensual}} = \frac{q_h \cdot HDD_{\text{mensual}}}{HDD_{\text{anual}}} , \quad q_{c, \text{mensual}} = \frac{q_c \cdot CDD_{\text{mensual}}}{CDD_{\text{anual}}} \quad (\text{Eq.103})$$

$$(\text{Eq.104})$$

El consum específic mensual d'electricitat i ACS, en canvi, es considera constant per als 12 mesos:

$$e_{mensual} = \frac{e}{N_{mesos}}, q_{ACS} = \frac{q_{ACS}}{N_{mesos}} \quad (\text{Eq.105})$$

$$(\text{Eq.106})$$

On:

$q_h$  és la calor necessària per calefacció

$q_c$  és la calor necessària per refrigeració

$q_{ACS}$  és la calor necessària per produir aigua calenta

## 5.10. Agregació del consum

Per tal de satisfer les necessitats de l'edifici, sovint és necessària la incorporació de refrigeradors per compressió mecànica (MCC) o tèrmica (TCC) que suposen una agregació al consum.

### 5.10.1. Agregació del consum per refrigeradors mecànics per compressió

En un sistema mCCHP amb un refrigerador per compressió mecànica es fa servir energia elèctrica per a condicionar l'espai residencial. El procés de conversió està caracteritzat pel COP que és la relació entre la quantitat de fred produïda pel refrigerador i la quantitat d'energia elèctrica utilitzada i acostuma a tenir un valor de 3, a partir del qual, es pot calcular el consum dels refrigeradors. El consum d'energia del sistema ( $e_{sis}$ ) es calcula com el sumatori dels diferents consums de l'edifici ( $e$ ) i el consum dels refrigeradors. De la mateixa manera, el consum tèrmic del sistema ( $q_{sis}$ ) són els diferents consums tèrmics de l'edifici i es calcula com el sumatori de la calor per a calefacció ( $q$ ) i la calor per a la producció d'ACS ( $q_{ACS}$ ).

El consum d'energia en sistemes amb refrigeració a partir de refrigeradors per compressió mecànica es calcula a partir de les següents expressions:

$$q_{sys} = q + q_{ACS} \quad (\text{Eq.107})$$

$$e_{sys} = q + \frac{q_c}{COP} \quad (\text{Eq.108})$$

El consum d'electricitat en aquest tipus de sistemes és baix durant la temporada de fred i alt durant la temporada de calor mentre que el consum de calor és baix durant la temporada de calor i alt durant la temporada de fred.

### 5.10.2. Agregació del consum per a refrigeradors tèrmics per compressió

En un sistema mCCHP amb un refrigerador per compressió tèrmica la càrrega tèrmica ha de cobrir el consum tèrmic tant de l'edifici com per la refrigeració i es considera constant durant l'any. El consum d'energia tèrmica per refrigeració depèn del coeficient de rendiment (COP<sub>a</sub>) del refrigerador. El valor d'aquest coeficient oscil·la normalment entre 0,6 i 0,8.

El consum d'energia en sistemes amb refrigeració a partir de refrigeradors per compressió tèrmica es calcula a partir de les següents expressions:

$$q_{sys} = q + q_{ACS} + \frac{q_c}{COP_a} \quad (\text{Eq.109})$$

$$e_{sys} = e \quad (\text{Eq.110})$$

## 5.11. Estimació de la càrrega

### 5.11.1. Càrrega i consum

La sortida de cada aparell proveïdor de l'edifici és l'energia total que produeix mentre que la càrrega representa només una part d'aquesta sortida que s'utilitza per cobrir la demanda de l'edifici. Una altra part de la càrrega és la que consumeixen els propis aparells proveïdors (com els consum de les bombes de recirculació o el dels intercanviadors de calor dels ventiladors). La part d'energia restant és la que es perd dissipant-se a l'exterior.

Per una altra banda, el consum es compon per l'entrada dels aparells que és l'energia total utilitzada per satisfer les necessitats de l'edifici més les seves pròpies necessitats energètiques

Per tal de que el sistema funcioni de manera òptima, la càrrega ha de cobrir el consum. Quan es dona aquesta condició el diagrama de càrrega coincideix amb el diagrama de consum tot i que és difícil que això es compleixi sempre i sovint s'integren dipòsits d'emmagatzematge entre proveïdors i consumidors d'energia per tal que es compleixin altres condicions:

- Permanent, on l'emmagatzematge cobreix el consum
- Periòdica, on els proveïdors subministren energia als sistemes d'emmagatzematge per tal que continguin prou energia segons els límits establerts.

El sistema de control que s'aplica en aquests casos ha de complir sempre la condició de que la diferència entre el consum i la càrrega no superi mai la capacitat d'emmagatzematge ( $\Delta E$ )

Ja que l'emmagatzematge cobreix el consum, el diagrama de càrrega es comporta com el de consum però està més suavitzat depenent del control que es faci en el sistema i de la capacitat de l'emmagatzematge.

### 5.11.2. Sistema d'estimació de la càrrega

La càrrega del sistema es defineix com la càrrega necessària per omplir el dipòsit o dipòsits d'emmagatzematge.

### 5.11.3. Compartició de càrrega

Per al correcte funcionament d'un sistema, els proveïdors han de poder cobrir la càrrega estimada i, per tant, la càrrega del sistema s'ha de repartir entre els diferents proveïdors i es pot trobar la càrrega diària per a cadascun.

Es poden seguir diferents estratègies per a la compartició de la càrrega, de les quals les més comuns són:

- Ús compartit impulsat per energia elèctrica (quan no apareix l'excés d'energia elèctrica)
- Ús compartit impulsat per calor (quan s'evita l'excés de calor)

## 5.12. Avaluació i millora del rendiment dels models estructurals

### 5.12.1. Indicadors per l'avaluació del rendiment a nivell del sistema

El rendiment d'un sistema es pot avaluar a partir de dos indicadors bàsics: el seu estalvi d'energia primària i la seva eficiència energètica.

L'estalvi d'energia primària (PES) fa referència al percentatge de combustible estalviat en la producció d'energia d'un sistema CCHP en comparació amb la producció de la mateixa quantitat d'energia si es realitzés amb un sistema de referència (utilitzant els valors  $\eta_{Eref}$  i  $\eta_{Href}$ ). El PES no aclareix si la producció del sistema CCHP és o no útil ja que obté un valor satisfactori tot i si es produeix energia en excés. Es calcula a partir de la següent expressió:

$$PES (\%) = \left( 1 - \frac{q_F}{\frac{e_{sis}}{\eta_{Eref}} + \frac{q_{sis}}{\eta_{Href}}} \right) \cdot 100 \quad (\text{Eq.111})$$

On:

PES és l'estalvi d'energia primària

$e_{sis}$  és l'energia elèctrica anual específica obtinguda pel sistema CCHP

$q_{sis}$  és l'energia tèrmica anual específica obtinguda pel sistema CCHP

$q_F$  és el consum de combustible específic del sistema CCHP

$\eta_{Href}$  és el valor de referència del rendiment per a la producció de calor per separat i pren un valor de 0,8

$\eta_{Eref}$  és el valor de referència del rendiment per a la producció d'electricitat per separat i pren un valor de 0,33

L'eficiència energètica (EFF) dona la relació entre l'energia primària i l'energia útil, és a dir, mostra quin percentatge d'energia primària es transforma en energia útil:

$$EFF (\%) = \frac{e_{sis} + q_{sis}}{q_F + e_{pV} + q_{ST}} \cdot 100 \quad (\text{Eq.112})$$

On:

EFF és l'eficiència energètica del sistema CCHP

$e_{sis}$  és l'energia elèctrica anual específica obtinguda pel sistema CCHP

$q_{sis}$  és l'energia tèrmica anual específica obtinguda pel sistema CCHP

$q_F$  és el consum de combustible específic del sistema CCHP

$e_{pV}$  és la producció específica anual d'electricitat dels panells fotovoltaics

$q_{ST}$  és la producció específica anual de calor dels panells solars tèrmics

### 5.13. Avaluació del rendiment dels models potencials estructurals

Per a l'avaluació del rendiment energètic en edificis també es poden fer servir com a indicadors el rendiment de l'energia integrada en l'edifici ( $E_{p,tot}$ ) i la relació d'energies renovables (RER).

El rendiment de l'energia integrada en l'edifici es calcula com la diferència entre la ponderació de l'energia subministrada i l'energia exportada pels portadors.

El rendiment total de l'energia integrada edifici és la suma d'aquests rendiments per a les energies renovables i per a les no renovables.

$$E_{p,tot} = E_{p,nren} + E_{p,ren} \quad (\text{Eq.113})$$

La relació d'energies renovables ve donada per la següent expressió:

$$RER (\%) = \frac{E_{p,ren}}{E_{p,tot}} \cdot 100 \quad (\text{Eq.114})$$

D'aquesta manera s'introdueix una distinció entre l'energia primària d'origen renovable i d'origen no renovable i la seva connexió amb el factor de l'energia primària total.

$$E_p = \sum E_{del,i} f_{p,del,i} - \sum E_{exp,i} f_{p,exp,i} \quad (\text{Eq.115})$$

On:

$E_p$  és la demanda d'energia primària

$E_{del,i}$  és la demanda d'energia final del portador i

$f_{p,del,i}$  és el factor d'energia primària del portador de demanda i

$E_{exp,i}$  és l'energia exportada final del portador i

$f_{p,exp,i}$  és el factor d'energia primària del portador d'exportació i

i és el nombre del portador

## 6. Disseny funcional de sistemes mCCHP-RES

El disseny funcional és la segona etapa del procés de disseny de sistemes de microtrigeneració. Aquesta etapa parteix dels models estructurals que donen lloc a l'etapa de disseny estructural i, la sortida, és una descripció completa del sistema mCCHP per tal de que es pugui implementar.

### 6.1. Modelització funcional de sistemes

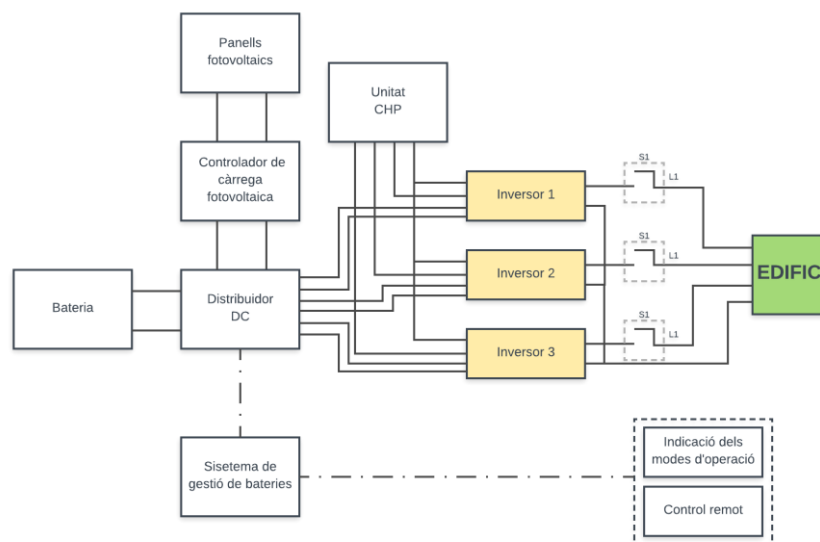
#### 6.1.1. Dimensionament dels components del sistema

Durant l'etapa del disseny estructural, el consum i la càrrega s'avaluaven mensualment i, com a resultat, s'obtenia el consum mensual de cada aparell, és a dir, la quantitat d'energia que consumeix cada aparell cada mes de l'any i també, la càrrega mensual dels proveïdors, és a dir, la quantitat d'energia que ha de subministrar cada mes per cobrir les necessitats energètiques juntament amb els altres proveïdors.

Durant l'etapa del disseny funcional s'ha de considerar que, tot i que per a cada mes el consum diari de l'edifici i la càrrega del sistema coincideixen, en períodes de temps més curts difereixen de la mitjana mensual i molt sovint no són iguals.

#### COMPONENTS DEL SISTEMA ELÈCTRIC

Els sistemes mCCHP autònoms subministren electricitat a un edifici fent servir una bateria o sistema de bateries i inversors ja siguin monofàsics o trifàsics per tal de construir una xarxa de suport.



**Figura 6.1:** Esquema del subsistema elèctric

Font: elaboració pròpia



Quan la xarxa està en funcionament, la seva potència de sortida ha de cobrir el consum residencial així com carregar les bateries quan els panells fotovoltaics no estiguin en funcionament. En canvi, quan la xarxa no ho està, el temps total de subministrament ve donat per la capacitat de les bateries i depèn del consum que hi hagi durant aquest temps.

També existeix la possibilitat d'implantar un sistema de control de bateries per garantir els procediments especials d'operació i allargar la vida de les bateries.

En alguns casos, especialment quan es fa servir energia fotovoltaica, l'energia elèctrica produïda no es pot fer servir pels consumidors ni pot ser emmagatzemada a les bateries així que la consumeix un escalfador elèctric per tal de produir aigua calenta en una caldera de suport.

Els diferents components que componen el subsistema elèctric són:

### PANELLS FOTOVOLTAICS

Els panells fotovoltaics es componen de diferents branques connectades en paral·lel i formades per diversos mòduls fotovoltaics connectats en sèrie entre sí. La connexió en sèrie dels mòduls determina el voltatge de sortida mentre que la connexió en paral·lel de les branques determina el corrent de sortida.

Per dimensionar un panell fotovoltaic cal seguir el següent procediment:

- 1) Determinar la quantitat d'energia produïda pel panell durant el mes en el qual produirà més energia:

$$E_{PVmax} = A_{TFA} \cdot e_{PVmax} \quad (\text{Eq.116})$$

- 2) Determinar la energia produïda en un dia d'aquest mes

$$E_{PVdia} = \frac{E_{PVmax}}{k \cdot N_{dies}} \quad (\text{Eq.117})$$

- 3) Determinar la potencia del panell fotovoltaic

$$P_{panellsPV} = \frac{E_{PVdia}}{t_{llumsolar}} \quad (\text{Eq.118})$$

On:

$E_{PVmax}$  és la quantitat d'energia produïda pel panell en el mes on més energia produeix en kWh/mes

$E_{PVdia}$  és l'energia produïda en un dia d'aquest mes en kWh/d

$P_{panellsPV}$  és la potència del panell fotovoltaic en kW

$A_{TFA}$  és l'àrea total del sòl en m<sup>2</sup>

$e_{PVmax}$  és la producció d'energia específica del panell durant el mes de major producció en  $kWh/m^2$

$N_{dies}$  son el nombre de dies del mes

$k$  és el factor de reducció que contempla els dies ennuvolats de cada mes que acostumen a ser 2 o 3. Aquest factor oscil·la entre 0,7 i 0,9

$t_{lumsolar}$  representa la mitjana d'hores de llum solar, a la potència nominal dels panells fotovoltaics ( $1.000 \text{ W/m}^2$ ). Acostuma a oscil·lar entre 4 i 8 hores de mitjana, depenent de l'àrea climàtica en la que es trobi l'edifici ( $t_{lumsolar}=H/1.000$ )

$H$  és la irradiació solar diària expressada en  $Wh/m^2$

Un cop coneguts aquests valors cal escollir un mòdul solar segons la potència màxima i el voltatge nominal que ofereixin.

El rendiment elèctric d'un mòdul fotovoltaic es representa a partir de la corba I-V (el corrent en front del voltatge per a una irradiància solar donada). Aquesta corba depèn de la irradiància (la il·luminació que rebí el mòdul) i de la temperatura. Per a un mòdul solar donat, el corrent màxim generat és directament proporcional a la irradiància solar i el voltatge entre els seus terminals es veu lleugerament reduït a mesura que s'incrementa la temperatura. La càrrega determina el punt d'operació del panell i és òptima quan correspon a la potència màxima del panell fotovoltaic.

- 4) El voltatge del panell fotovoltaic ( $V_{cc}$ ) s'escull d'acord amb la Taula 6.1, les capacitats d'entrada i de sortida dels inversors i el voltatge dels aparells consumidors .

Potència del sistema fotovoltaic (Wp)	Voltatge recomanat ( $V_{cc}$ )
0-500	12
500-2.000	24
2.000-10.000	48
>10.000	>48

**Taula 6.1:** Voltatges recomanats per als sistemes fotovoltaics [4]

- 5) La topologia del panell fotovoltaic s'estableix segons la potència i el voltatge tant del panell com dels seus mòduls.

Per al càlcul del nombre del mòduls a instal·lar ( $n_{SM}$ ) serà el nombre enter parell immediatament superior al que resulti de la següent expressió que relaciona la potència dels panells amb la dels mòduls solars:

$$n_{SM} = \frac{P_{panellsPV}}{P_{SMn}} \quad (\text{Eq.119})$$

Per calcular quants mòduls cal connectar en sèrie per formar una branca es fa servir la següent expressió:

$$n_{SMs} = \frac{V_{cc}}{V_{SMn}} \quad (\text{Eq.120})$$

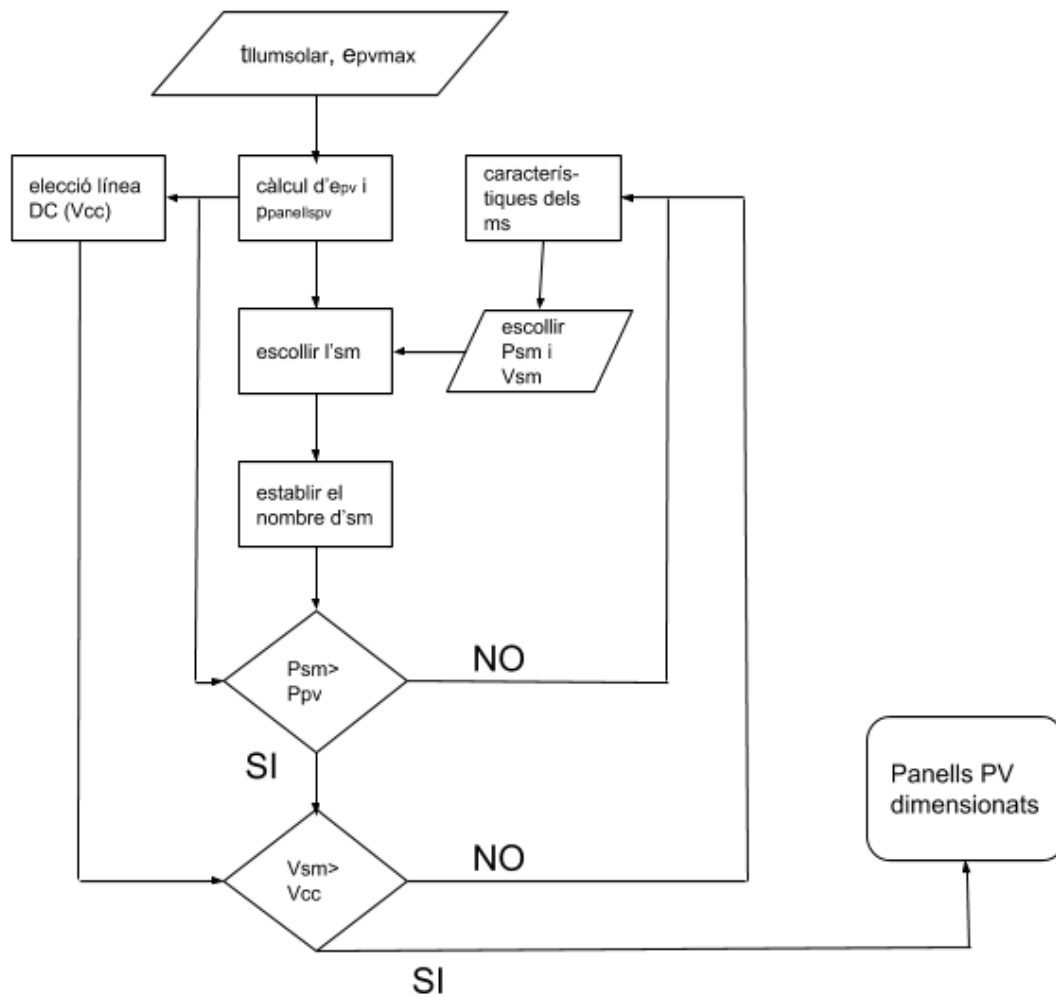
De la mateixa manera, el nombre de branques que cal connectar en paral·lel es calcula a partir de la següent relació:

$$n_{SMp} = \frac{n_{SM}}{n_{SMs}} \quad (\text{Eq.121})$$

L'aparició d'ombres pot fer que no tots els mòduls rebin la mateixa irradiància solar i, quan un sol mòdul solar està tapat per l'ombra, apareix el risc de sobreescalfament i de que es causi un dany permanent. El sobreescalfament als mòduls solars en sèrie es pot evitar amb l'ús de díodes bypass en els panells.

En la connexió en paral·lel es poden produir circulacions de corrent en sentit contrari a causa de les ombres i, per evitar aquest efecte no desitjat, s'utilitzen díodes de bloqueig.

La figura 6.2 il·lustra el procediment que cal seguir durant l'elecció de les bateries:



**Figura 6.2:** Algorisme per al dimensionament dels panells fotovoltaics

Font: elaboració pròpia

### **CAPACITAT DE LES BATERIES**

Les bateries d'àcid de plom són les més freqüents en sistemes d'energia fotovoltaica ja que no tenen un preu elevat, es troben disponibles en diferents mides i tenen unes característiques de rendiment conegudes. També es poden fer servir bateries de níquel-cadmi, però el seu ús queda reduït a aquelles situacions on es requereixen aplicacions a baixa temperatura i el seu elevat cost inicial és un desavantatge. Cada tipus de bateria presenta certs avantatges i inconvenients, per tant, caldrà estudiar bé el sistema per escollir la bateria més adient.

Les bateries es caracteritzen principalment per la seva capacitat ( $C$ ), expressada en Ah i pel seu voltatge ( $V$ ) en volts, sent  $I$  el corrent i  $t$  el temps. La capacitat s'expressa per a un voltatge donat, per exemple, una bateria amb una capacitat de 100Ah proporcionarà 1A de corrent durant 100 h. Aquesta capacitat ve donada per la quantitat d'energia que es necessita i per quant de temps serà necessari que la bateria subministri aquesta energia. Generalment, les capacitats de les bateries es dimensionen d'acord amb el pic elèctric amb el que hauran de

complir o amb la càrrega elèctrica base. Els sistemes energètics alternatius funcionen millor amb entre 1 i 3 dies del seu potencial d'emmagatzemament.

Capacitat d'emmagatzemament mínima (Ah) en bateries de 48V (Ah)	Consum mitjà (kWh/dia)
420	Fins a 15
490	Fins a 20
600	Fins a 30
800	Fins a 50
1.000	Fins a 70
1.200	Fins a 90

**Taula 6.2:** Consum de les bateries [4]

A vegades es fa servir una bateria amb una capacitat superior a la necessària, disminuint aleshores els cicles de càrrega i descàrrega i incrementant la seva vida útil. Les bateries proporcionen DC, per tant, és necessària la col·locació d'inversors ja que les cases operen en AC.

Per dimensionar les bateries cal seguir el següent procediment:

- 1) Determinar la quantitat d'energia a emmagatzemar en les bateries tenint en compte que ha de cobrir el consum per a certs dies que seran generalment 1 o 2 al mes amb un major consum d'electricitat. Es calcula a partir de la següent relació:

$$E_{need} = \frac{A_{TFA} \cdot e_{max}}{N_{days}} \cdot N_{dayneed} \quad (\text{Eq.122})$$

On:

$E_{need}$  és la quantitat d'energia a emmagatzemar en kWh

$N_{dayneed}$  és el nombre de dies en els que caldrà cobrir el consum

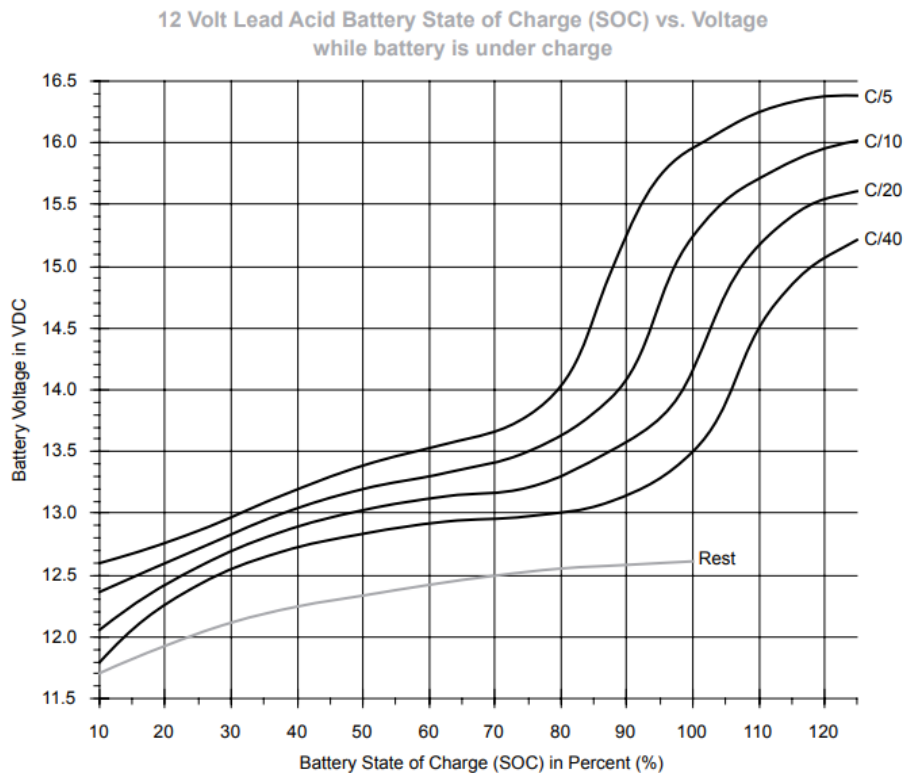
$A_{TFA}$  és l'àrea total del sòl en m<sup>2</sup>

$e_{max}$  és el consum d'energia específic al mes amb major consum en kWh/m<sup>2</sup>

$N_{days}$  és el nombre de dies d'aquest mes

- 2) Escollir el voltatge de cada bateria  $V_{bateria}$  i del banc de bateries  $V_{bateries}=V_{cc}$ .

El voltatge de les bateries depèn de la relació entre la capacitat de les bateries i si reben o subministren energia. En les bateries d'àcid-plom, el seu voltatge indica la quantitat d'energia emmagatzemada al seu interior.



**Figura 6.3:** Voltatge restant en una bateria d'acid-plom en front de l'estat de càrrega

Font: quora[11]

Les taxes de càrrega i descàrrega venen donades per la capacitat de la bateria en relació amb el temps. Aquestes taxes són igual a la capacitat de la bateria en Ah dividida entre el temps que dura el cicle de la bateria en h. Per exemple, si es carrega una bateria completament descarregada en un període de 10 h, la taxa serà de C/10.

Les bateries d'acid-plom de cicle profund es recarreguen contínuament a taxes més ràpides que C/10 i tenen un temps de vida més curt i la millor taxa de càrrega global per a aquestes bateries és C/20, ja que garanteix un bon rendiment i més temps de vida ja que redueix l'estrès de la placa.

Per obtenir la tensió DC en les línies,  $V_{cc}$ , es connecten  $n_1$  bateries en sèrie:

$$n_1 = \frac{V_{cc}}{V_{bateria}} \quad (\text{Eq.123})$$

Aquestes bateries es poden carregar i descarregar repetidament fins al 80% de la seva capacitat i és convenient omplir-les completament a cada cicle.

**3) Determinar la capacitat del sistema de bateries:**

$$C_{bateries} = \frac{E_{need}}{V_{cc}} \quad (\text{Eq.124})$$

La capacitat disponible d'un acumulador no correspon a la seva taxa C/20 (corresponent a una descàrrega durant 20 h a 25 °C), sinó a la capacitat real disponible durant el temps de treball. Els acumuladors no es poden descarregar per sota d'un cert nivell ja que si ho fan corren el risc de ser danyats. En un ús normal dels acumuladors i sense problemes derivats de les baixes temperatures, un nivell de descàrrega (ND) acceptable oscil·la entre 0,7 i 0,8 depenent del model de bateria secundari: 0,7 per a bateries que aguanten un nombre petit de recàrregues i 0,8 per a les que es poden recarregar més vegades. Una bateria carregada al 70% es troba alhora descarregada al 30% (ND=0,3) i, de la mateixa manera, una bateria carregada al 30% es troba alhora descarregada al 70% (ND=0,7). Si la bateria es recarrega de manera sovint, l'ND es redueix per tal de prolongar la vida útil. El coeficient de reducció de la capacitat (RT) depèn de la temperatura mínima que el sistema pot suportar. A partir d'aquests dos fenòmens deguts a la temperatura i al nivell màxim de descàrrega, es pot calcular la capacitat nominal:

$$C_{20} = \frac{C_{bateries}}{ND \cdot RT} \quad (\text{Eq.125})$$

On:

$C_{20}$  és la capacitat nominal

ND és el nivell de descàrrega màxim permès

RT és el coeficient de reducció de capacitat

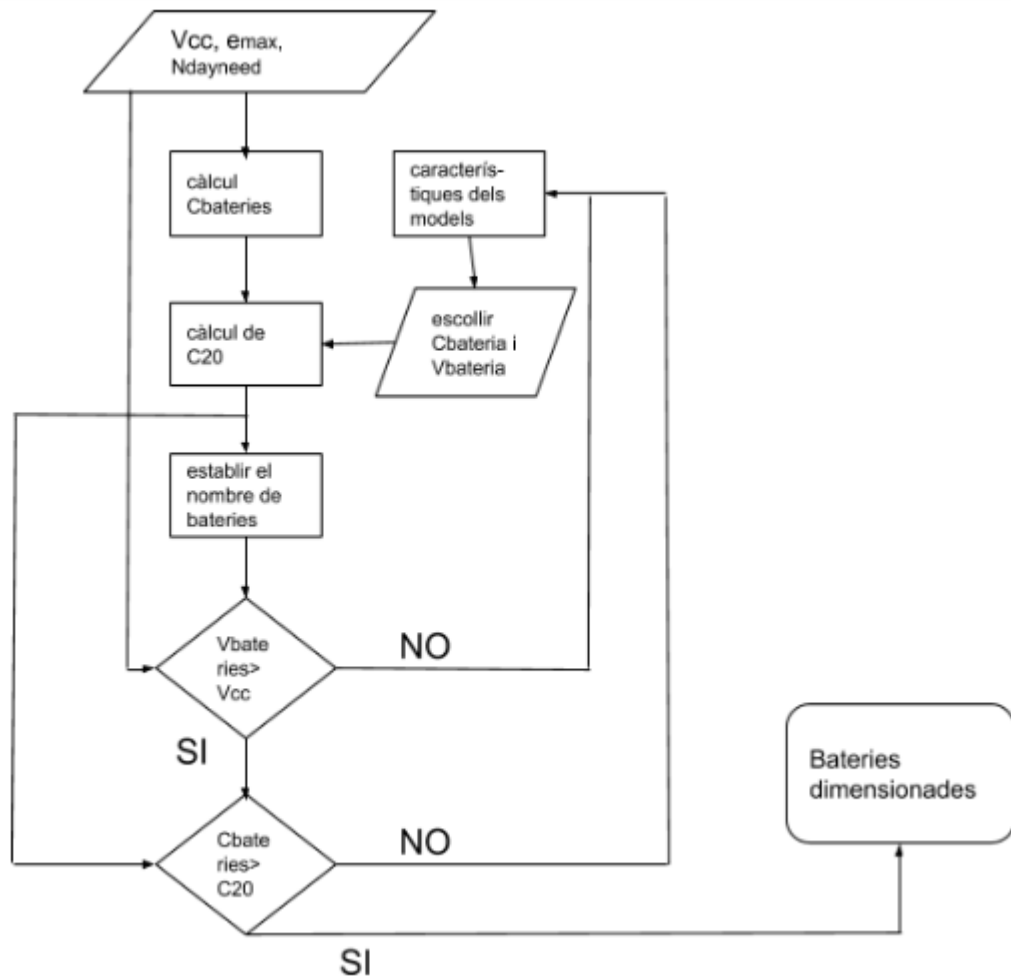
És molt desitjable que la zona de l'edifici on s'instal·la el sistema acumulador no tingui temperatures baixes ja que així el coeficient de reducció de la capacitat tindrà valor 1 i el sistema serà més eficient. El valor del nivell de descàrrega màxim escollit serà la mitjana dels valors del rang acceptable, per tant ND=0,75. Per a l'obtenció d'una capacitat  $C_{20}$ , es connectaran  $n_2$  files de bateries en paral·lel amb una capacitat  $C_{bateria}$  per a cada fila.

**4) Determinar el nombre de files de bateries:**

$$n_2 = \frac{C_{20}}{C_{bateria}} \quad (\text{Eq.126})$$

5) Determinar el nombre de bateries:

$$n_{bateries} = n_1 \cdot n_2 \quad (\text{Eq.127})$$



**Figura 6.4:** Algorisme per al dimensionament de les bateries

Font: elaboració pròpia

### **CONTROLADOR DE CÀRREGA SOLAR**

En aquells moments durant els quals el sistema no produeix electricitat, és necessària l'actuació de les bateries i també d'un controlador de càrrega. Aquests controladors regulen el flux d'electricitat entre la font, el sistema d'emmagatzematge i la càrrega als sistemes autònoms i s'encarreguen també de mantenir la bateria plena sense sobrecarregar-la. Quan el controlador detecta que la bateria està completament o quasi completament carregada,



redueix o atura el flux d'electricitat provinent de la font o el deriva a una càrrega auxiliar com pot ser un escalfador elèctric d'aigua. Alguns controladors també detecten quan les càrregues estan rebent massa energia per part de les bateries i, com a conseqüència, aturen el flux fins que les bateries tornen a tenir cert nivell de càrrega. Els controladors de càrrega moderns per a sistemes amb panells fotovoltaics son capaços de realitzar un seguiment del punt de màxima potència, reduint així les pèrdues d'energia fins a un 30%.

Per escollir un voltatge de la bateria ( $V_{cc}$ ) cal tenir en compte certs factors:

- El voltatge d'entrada al controlador de càrrega solar ( $V_{sc}$ ) ha de ser superior al voltatge màxim del panell fotovoltaic:  $V_{sc} > V_{cc}$
- La potència d'entrada al controlador de càrrega solar ( $P_{sc}$ ) ha de ser superior a la potència màxima del panell fotovoltaic:  $P_{sc} > P_{pvp}$
- El corrent de càrrega màxim de les bateries

### **UNITAT DE COGENERACIÓ**

La potència elèctrica de la unitat CHP s'obté a partir de la següent expressió:

$$P_{CHP} = \frac{A_{TFA} \cdot e_{max}}{N_{dies} \cdot t_{oper}} \quad (\text{Eq.128})$$

On:

$A_{TFA}$  és l'àrea total del sòl en  $m^2$

$e_{CHPmax}$  és el valor de l'energia específica per al mes on la unitat CHP té una càrrega més gran en  $kWh/m^2$

$N_{dies}$  és el nombre de dies d'aquest mes

$t_{oper}$  és el temps diari d'operació en h. Acostuma a ser d'entre 6 i 8 hores

Un cop escollit el model del mercat, una unitat CHP amb potència nominal  $P_{CHPn}$  compleix la relació:  $P_{CHPn} \geq P_{CHP}$

### **INVERSORS**

La gran majoria d'aparells que es faran servir a dins de l'edifici funcionen amb corrent altern i això és un inconvenient ja que l'energia generada a partir dels panells fotovoltaics funciona amb corrent continu. Per a satisfer les necessitats de l'edifici, és necessari convertir aquesta energia en DC en energia en AC a partir de l'ús d'inversors i altres equipaments de condicionament de potència. Es troben tres condicions bàsiques que cal complir:

- Conversió de la potència constant en DC a potència oscil·lant en AC a 50 Hz
- La consistència de la tensió, és a dir, fins a quin punt fluctua la tensió de sortida
- Qualitat de la corba sinusoidal AC si la forma de l'ona AC és irregular o suau

Per escollir un inversor adequat cal tenir en compte el voltatge de les bateries i la potència màxima dels aparells consumidors, el tipus i els seus règims de treball.

L'equipament d'equilibri del sistema per a un sistema sense connexió a la xarxa consta de bateries, un controlador de càrrega, un inversor, equipament de seguretat, aparells de mesura i instrumentació.

Per tal de dimensionar un inversor cal complir les següents condicions:

- Capacitat nominal de sortida de l'inversor  $P_{\text{sortida}} > P_{\text{CHP}}$
- Voltatge d'entrada de l'inversor  $V_{\text{entrada}} = V_{\text{CC}}$  (igual amb el voltatge nominal de les bateries)
- Voltatge nominal de sortida  $V_{\text{sortida}}$ : 220-230 V<sub>AC</sub>
- Distorsió harmònica total THD: <4%
- Freqüència de sortida: 50±0,05 Hz

### **COMPONENTS DEL SUBSISTEMA TÈRMIC**

Un sistema de calefacció que funcioni a partir d'energia solar ha de constar de col·lectors solars, una estació de bombes, un tanc d'aigua calenta, una font de calor de suport (i unitat CHP), un sistema de distribució d'aigua calenta, un controlador solar i un tanc d'expansió.

En el sistema d'escalfament d'aigua, tots els elements llistats anteriorment realitzen la seva funció per tal d'obtenir l'aigua calenta. Primer, el col·lector tèrmic rep la radiació solar i escalfa el líquid de transferència de calor que conté. Un cop s'ha escalfat aquest líquid, una bomba el fa circular fins la bobina del tanc d'aigua on transfereix la seva calor a l'aigua de l'interior del tanc i seguidament el torna a fer circular cap al col·lector per tal que es torni a escalfar. Seguidament, quan la unitat CHP es posa en funcionament, l'energia tèrmica s'emmagatzema al tanc i, quan és necessari, es fa ús d'una font de calor de suport com una caldera o algun element elèctric d'immersió per tal d'escalfar l'aigua del tanc fins a la temperatura desitjada i ser posteriorment distribuïda. Un controlador de diferència de temperatura compara la temperatura exterior amb la demanda d'aigua calenta i regula la circulació del líquid de transferència de calor per tal d'escalfar l'aigua fins a la temperatura necessària de manera òptima. El tanc d'expansió s'encarrega de regular la pressió del sistema mentre el líquid de transferència de calor s'expandeix i es contrau.

### **PANELLS SOLARS TÈRMICS**

Aquests panells es caracteritzen bàsicament per l'àrea del col·lector i per les seves dades de rendiment. Aquestes dades són l'eficiència ( $\eta_{\text{ST}}$ ) en %, la taxa de flux nominal en l/h i la pressió màxima d'operació en bars.

Per tal de dimensionar els panells solars tèrmics la superfície d'absorció es determinarà seguint el següent procediment:

- Determinar la quantitat d'energia produïda pel panell solar tèrmic al mes de major producció:

$$Q_{STmax} = A_{TFA} \cdot q_{STmax} \quad (\text{Eq.129})$$

- Determinar l'energia produïda en un dia d'aquest mes:

$$Q_{STdia} = \frac{Q_{STmax}}{k \cdot N_{dies}} \quad (\text{Eq.130})$$

- El flux de calor es farà servir per escollir la bomba i es calcula amb la següent expressió:

$$\dot{Q}_{dia} = \frac{Q_{STdia}}{t_{llumsolar}} \quad (\text{Eq.131})$$

On:

$Q_{STmax}$  és la quantitat d'energia produïda pel panell al mes de major producció en kWh/mes

$Q_{STdia}$  és l'energia produïda en un dia d'aquest mes en kWh/dia

$\dot{Q}_{dia}$  és el flux de calor en kW

$A_{TFA}$  és l'àrea total del sòl en  $m^2$

$q_{STmax}$  és la producció de calor específica del panell durant el mes de major producció en  $kWh/m^2$

$N_{dies}$  son el nombre de dies del mes

$k$  és el factor de reducció que contempla els dies ennuvolats de cada mes que acostumen a ser 2 o 3. Aquest factor oscil·la entre 0,7 i 0,9

$t_{llumsolar}$  representa la mitjana d'hores de llum solar, a la potència nominal dels panells solars tèrmics ( $1.000 \text{ W/m}^2$ ). Acostuma a oscil·lar entre 4 i 6 hores de mitjana, depenent de l'àrea climàtica en la que es trobi l'edifici

- Determinar l'àrea d'absorció a partir de l'expressió:

$$A_{ST} = \frac{Q_{STdia}}{H} \quad (\text{Eq.132})$$

On:

$A_{ST}$  és la superfície d'absorció del panell en  $m^2$

$Q_{STdia}$  és l'energia produïda en un dia d'aquest mes en kWh/dia

$H$  és la irradiància solar diària en  $kWh/m^2$

Caldrà escollir el col·lector solar tèrmic amb una àrea d'absorció nominal ( $A_{STn}$ ) i una eficiència òptica  $\eta_{STo}$  adients a partir dels fulls de dades dels productes disponibles. Un cop conegudes aquestes dades és possible calcular el nombre de col·lectors solars tèrmics necessaris:

$$n_{ST} > \frac{A_{ST}}{\eta_{STo} \cdot A_{STn}} \quad (\text{Eq.133})$$

Tots els tipus de col·lectors son capaços d'operar en diverses taxes de flux (s'expressen en  $\text{l/h}\cdot\text{m}^2$ ) i, cadascuna representa una caiguda de pressió diferent en els col·lectors i també canvien l'increment de temperatura en el panell. El flux desitjat acostuma a ser d'uns  $30 \text{ l/h}\cdot\text{m}^2$  ja que minimitza la caiguda de pressió al sistema, per tant es podran instal·lar toveres més estretes i la bomba consumirà menys energia. El flux seleccionat ha de ser suficient per que al passar per l'intercanviador de calor pugui dur a terme aquest intercanvi entre el sistema i el tanc. L'augment de temperatura als col·lectors dependrà de la irradiància que rebin, l'angle d'incidència d'aquesta i la temperatura ambient. Un cop coneguda l'energia de sortida que proporcionen els col·lectors, l'increment de temperatura ve donat per la següent expressió:

$$\Delta\vartheta = \frac{\dot{Q}_{dia}}{\rho \cdot c \cdot \dot{V}} \quad (\text{Eq.134})$$

Aquesta variació en la temperatura al llarg del col·lector es fa servir al programar els controladors i la velocitat de la bomba es varia per tal que aquest valor es mantingui.

## CALDERA DE SUPORT

Ahora d'escollir una caldera de suport cal tenir en compte la seva potència tèrmica (kW), la seva eficiència  $\eta_{ST}$  (%), el flux volumètric nominal del seu circuit hidràulic ( $\text{l/h}$ ) i la seva pressió màxima d'operació (bars).

Per tal de dimensionar aquesta caldera, primer és necessari calcular la potència tèrmica màxima a partir dels següents passos:

- Determinar la quantitat d'energia que ha de produir al mes amb una càrrega major:

$$Q_{admax} = A_{TFA} \cdot q_{admax} \quad (\text{Eq.135})$$

- Determinar l'energia produïda en un dia d'aquest mes:

$$Q_{addia} = \frac{Q_{admax}}{N_{dies}} \quad (\text{Eq.136})$$

- Determinar la potència tèrmica:

$$\dot{Q}_{ad} = \frac{Q_{addia}}{t_{oper}} \quad (\text{Eq.137})$$

On:

$Q_{admax}$  és la quantitat d'energia produïda per la caldera al mes de major càrrega en kWh/mes

$Q_{addia}$  és l'energia produïda en un dia d'aquest mes en kWh/dia

$\dot{Q}_{ad}$  és la potència tèrmica en kW

$A_{TFA}$  és l'àrea total del sòl en  $m^2$

$q_{admax}$  és el valor de la producció específica de calor al mes amb una major producció per part de la caldera de suport en  $kWh/m^2$

$N_{dies}$  són el nombre de dies del mes

$t_{oper}$  és el temps diari d'operació de la caldera de suport a la potència tèrmica nominal i acostuma a oscil·lar entre 6 i 8 h de mitjana

Un cop coneguda la potència tèrmica de la caldera s'ha d'escollir un model dels disponibles al mercat tal que compleixi la relació:  $\dot{Q}_{ad,n} \geq \dot{Q}_{ad}$

## REFRIGERADOR

Un sistema de refrigeració que faci ús de tecnologies d'absorció o adsorció s'ha de compondre de tres circuits hidràulics: el de conducció de calor, el de distribució de fred i el de rebuig de calor.

Per tal de dimensionar el refrigerador és necessari calcular la potència màxima de refrigeració seguint els següents passos:

- Determinar la quantitat de fred produïda pel refrigerador al mes amb major càrrega de refrigeració:

$$Q_{refrigeraci \acute{o},max} = A_{TFA} \cdot q_{refrigeraci \acute{o},max} \quad (\text{Eq.138})$$

- Determinar la quantitat de fred produïda en un dia d'aquest mes:

$$Q_{refrigeraci\ \acute{o},dia} = \frac{Q_{refrigeraci\ \acute{o},max}}{k \cdot N_{dies}} \quad (\text{Eq.139})$$

- Determinar la potència màxima de refrigeració:

$$\dot{Q}_{refrigeraci\ \acute{o}} = \frac{Q_{refrigeraci\ \acute{o},dia}}{t_{oper}} \quad (\text{Eq.140})$$

On:

$Q_{refrigeraci\ \acute{o},max}$  és la quantitat de fred produïda pel refrigerador al mes amb major càrrega en kWh/mes

$Q_{refrigeraci\ \acute{o},dia}$  és la quantitat de fred produïda en un dia d'aquest mes en kWh/dia

$\dot{Q}_{refrigeraci\ \acute{o}}$  és la potència màxima de refrigeració en kW

$A_{TFA}$  és l'àrea total del sòl en m<sup>2</sup>

$q_{refrigeraci\ \acute{o},max}$  és la quantitat específica de fred produïda pel refrigerador al mes amb major càrrega en kWh/m<sup>2</sup>

$N_{dies}$  son el nombre de dies del mes

$k$  és el factor de reducció que contempla els dies ennuvolats de cada mes que acostumen a ser 2 o 3. Aquest factor oscil·la entre 0,7 i 0,9

Un cop coneguda la potència del refrigerador s'ha d'escollir un model dels disponibles al mercat amb una capacitat nominal de refrigeració tal que:

$$\dot{Q}_{refrigeraci\ \acute{o},n} \geq \dot{Q}_{refrigeraci\ \acute{o}} \quad (\text{Eq.141})$$

Durant l'estiu, es fa servir un tanc amb separació hidràulica per al condicionament d'aire i un sistema de ventilació s'encarrega de distribuir el fred per l'edifici.

## DIPÒSIT DE CALOR

Un tanc destinat a l'emmagatzematge de calor es caracteritza per els següents factors:

- Domini de temperatures
- Capacitat d'emmagatzematge
- Agent tèrmic d'emmagatzematge
- Mida
- Costos d'inversió
- Recursos energètics utilitzats

- Seguretat en la seva explotació

Ahora de dimensionar el dipòsit de calor, el primer que cal fer és establir el domini de temperatures fixant la temperatura màxima  $\vartheta_{\max}$  i la mínima  $\vartheta_{\min}$  que hauran de ser compatibles amb el tanc d'emmagatzematge i amb els aparells amb els que es produirà l'intercanvi de calor. La temperatura màxima del cilindre ve donada per l'aigua metre que la temperatura mínima serà la variable que determini el volum del cilindre. Per a dimensionar el cilindre contenidor de l'ACS s'agafa la temperatura mitjana de l'aigua freda com a temperatura mínima.

Seguidament cal avaluar la capacitat del dipòsit que és la capacitat màxima de calor que és possible emmagatzemar al tanc. És necessari conèixer detalladament l'evolució temporal dels fluxos tèrmics produïts i consumits per tal d'avaluar la capacitat del dipòsit ja que la diferència entre ells ha de ser coberta per aquest. Per tal d'avaluar aquests fluxos cal realitzar la simulació del sistema mCCHP en els diversos escenaris i determinar la capacitat màxima de calor que s'emmagatzemarà al tanc per cadascun d'ells.

Per dimensionar el tanc d'emmagatzematge de calor o fred cal seguir el següent procediment:

- Determinar la demanda energètica al mes amb una demanda més gran:

$$Q_{demandada, max} = A_{TFA} \cdot q_{sis, max} \quad (\text{Eq.142})$$

- Determinar l'energia produïda en un dia d'aquest mes:

$$Q_{demandada, dia} = \frac{Q_{demandada, max}}{N_{dies}} \quad (\text{Eq.143})$$

On:

$Q_{demandada, max}$  és la demanda energètica al mes amb major càrrega en kWh/mes

$Q_{demandada, dia}$  és la quantitat de fred produïda en un dia d'aquest mes en kWh/dia

$A_{TFA}$  és l'àrea total del sòl en m<sup>2</sup>

$q_{sis, max}$  és l'energia màxima del sistema la mes amb major càrrega en kWh/m<sup>2</sup>

$N_{dies}$  son el nombre de dies del mes

A partir d'aquestes expressions es pot dimensionar el tanc i, el seu volum interior coincidirà amb el volum de l'agent tèrmic (aigua) que emmagatzema. La quantitat màxima de calor que pot emmagatzemar l'agent tèrmic es determina amb la següent expressió:

$$Q_{demandada, dia} = Q_{max, emmagatzemada} = \rho \cdot V \cdot c_p \cdot \Delta\vartheta \quad (\text{Eq.144})$$

On:

$Q_{\max, \text{emmagatzemada}}$  és la quantitat de calor màxima emmagatzemada en kWh

$\rho$  és la densitat de l'agent tèrmic en  $\text{kg/m}^3$

$V$  és el volum de l'agent tèrmic en  $\text{m}^3$

$c_p$  és la calor específica de l'agent tèrmic en  $\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$

$\Delta\vartheta$  és la diferència entre els extrems del domini de temperatura per a l'agent tèrmic en  $^{\circ}\text{C}$

El dimensionament del tanc per a sistemes simples (una única font i un únic consumidor) es calcula a partir de la següent expressió:

$$V_H = \frac{Q_{H, \max}}{\rho \cdot c_p \cdot \Delta\vartheta_H} \quad (\text{Eq.145})$$

On:

$V_H$  és el volum del tanc per escalfament en  $\text{m}^3$

$\Delta\vartheta_H$  és el domini de temperatures de l'agent tèrmic que omple el tanc

Ahora, per a alguns sistemes simples és possible utilitzar una expressió simplificada. Per exemple, en el cas de fer servir panells tèrmics solars, el volum es pot calcular amb l'expressió:

$$V = k \cdot A_{ST} \quad (\text{Eq.146})$$

On:

$k$  és el coeficient de dimensionament en  $\text{l/m}^2$ . Per a la majoria d'aplicacions, el seu valor oscil·la entre 50 i  $100 \text{ l/m}^2$  tot i que per a aplicacions perfeccionades a través de sistemes de gestió energètica és de  $25 \text{ l/m}^2$ .

$A_{ST}$  és l'àrea de l'absorbidor del panell solar tèrmic en  $\text{m}^2$

Per a un mateix volum d'aigua calculat a partir de les equacions anteriors es poden escollir diverses opcions per al seu emmagatzematge ja que es pot optar per emmagatzemar-la en un sol tanc o en més d'un. Un tanc individual, sovint amb forma de cilindre vertical, té l'inconvenient de que no és fàcil de situar ni de transportar però té alhora menys pèrdues de calor. En canvi, si es fan servir dos o més tancs de dimensions més reduïdes per al mateix volum d'aigua, la superfície a través de la qual es perd calor augmenta i les pèrdues seran majors. De totes formes, aquestes pèrdues es poden mitigar amb una millor encapsulació o amb una solució d'un tanc dins d'un altre tanc.



## 5) CIRCUITS HIDRÀULICS

La funció dels circuits hidràulics és la de connectar dos components importants d'un sistema mCCHP per tal que s'efectuï una transferència de calor entre ells. Alhora de dimensionar un circuit hidràulic s'han d'establir les característiques tècniques dels elements dels quals es compona i també s'han d'establir els valors reals dels paràmetres d'operació del circuit. Els paràmetres d'un circuit dissenyat per tal de transportar energia tèrmica són els següents:

$\dot{Q}$	Flux de calor	kW
$\dot{V}$	Flux volumètric	m <sup>3</sup> /h
$\Delta\theta$	Diferència de temperatures	°C
$\rho$	Densitat del fluid tèrmic	kg/m <sup>3</sup>
$H_o$	Pressió de pressurització del fluid tèrmic	Pa
$c$	Capacitat de calor específica del fluid tèrmic	kWh/kg°C
$v$	Velocitat del flux	m/s

**Taula 6.3:** Paràmetres dels circuits hidràulics

Per tal de dimensionar un circuit hidràulic cal seguir el següent procediment:

- Establiment del circuit

Cal definir la localització de cada element del circuit i escollir les toveres adjacents i els seus accessoris. El paràmetre més important alhora d'escollir una tovera és el seu diàmetre intern i es dimensiona a partir de l'expressió:

$$DN = 4,6 \cdot \sqrt{\frac{\dot{V}}{v}} \quad (\text{Eq.147})$$

On:

DN és el diàmetre intern en mm

$\dot{V}$  és el flux volumètric en l/min

$v$  és la velocitat del flux en m/s

Per tal de minimitzar les pèrdues de pressió produïdes en la tovera, cal limitar la velocitat del flux que circula a través seu de manera que no excedeixi d'1 m/s. La velocitat ideal per aquest flux oscil·la entre 0,4 i 1 m/s ja que aquestes velocitats representen una caiguda de pressió d'entre 1 i 2,5 mbar/m de longitud de la tovera.

El flux volumètric expressat en m<sup>3</sup>/s es pot calcular a partir de la següent expressió:

$$\dot{V} = \frac{\dot{Q}}{\rho \cdot c \cdot \Delta\theta} \quad (\text{Eq.148})$$

La taula 6.4 mostra les mides recomanades per a les toveres utilitzades en sistemes domèstics:

Àrea del col·lector (m <sup>2</sup> )	Taxa de flux (l/min)	Diàmetre exterior de la tovera de coure (mm)	Pressió (mbar)
2	120	15 x 1	8,5
3	180	15 x 1	12,5
4	240	15 x 1	17
5	300	22 x 1	21
6	260	22 x 1	25
8	240	22 x 1	33

**Taula 6.4:** Característiques de les toveres segons el col·lector

- Trobar la corba del circuit

La corba del circuit és una expressió matemàtica que relaciona la calor entregat (o la pressió requerida per al moviment del fluid) amb el flux volumètric. Aquesta corba representa qualsevol règim d'operació del circuit a través d'uns determinats valors per als paràmetres de l'equació de manera que un punt d'operació determinat correspon a uns certs valors dels paràmetres d'operació. Equació d la corba:

$$H_{Ges} = H_{geo} + H_A \quad (\text{Eq.149-152})$$

$$H_A = H_{VL} + H_{VA}$$

$$H_{VL} = R \cdot L$$

$$H_{VA} = \sum \zeta \frac{\rho v^2}{2}$$

On:

$H_{Ges}$  és la calor entregat en Pa

$H_{geo}$  és la diferència de pressió geodèsica en Pa

$H_A$  son les pèrdues de pressió al llarg del circuit hidràulic en Pa

$H_{VL}$  son les pèrdues per pressió a la tovera en Pa

$H_{VA}$  son les pèrdues per pressió als complements en Pa

$R$  és la resistència a la fricció de la tovera en Pa/m

$L$  és la longitud de la tovera en m

$\zeta$  és el coeficient de resistència i és diferent per a cada element del circuit. El seu valor ve donat pel full de dades del fabricant.

$H_{geo}$  no depèn del flux volumètric i roman constant mentre que  $H_{VL}$  i  $H_{VA}$  augmenten quadràticament degut tant a les pèrdues a les toveres i als complements com a l'augment de

fricció. En la majoria dels casos, els circuits hidràulics destinats al transport de calor són circuits tancats i, per tant, la diferència de pressió geodèsica pren un valor nul. Les pèrdues per pressió al circuit hidràulic,  $H_A$  en Pa corresponen a la diferència d'alçada,  $h$  en m segons la següent relació:

$$h = \frac{H_A}{\rho \cdot g} \quad (\text{Eq.153})$$

On  $g$  representa la força de la gravetat i el seu valor és de 9,81 m/s

- Selecció de la bomba i establiment dels valors dels paràmetres d'operació del circuit  
La corba d'una bomba és una expressió matemàtica que representa la relació entre la calor entregada (la pressió total requerida pel moviment del fluid) i el flux volumètric. Aquesta corba es dedueix experimentalment i és la característica principal d'una bomba centrífuga amb aplicacions per a transport de calor.

Els paràmetres d'operació de les bombes de circulació són els següents:

- Flux volumètric  $\dot{V}$  en m<sup>3</sup>/h
- Calor entregat (pressió total requerida pel moviment del fluid)  $H_{Ges}$  en Pa
- Consum de potència  $P$  en W

A partir d'aquests paràmetres es poden representar tots els règims d'operació de les bombes i cadascun correspondrà a un punt particular de la corba.

A partir del flux volumètric es pot calcular la potència hidràulica de la bomba:

$$P_h = \frac{\dot{V} \cdot H_{Ges}}{3,6 \cdot 10^6} \quad (\text{Eq.154})$$

On:

$P_h$  és la potència hidràulica de la bomba en Pa

$\dot{V}$  és el flux volumètric en m<sup>3</sup>/h

$H_{Ges}$  és la pressió hidràulica del circuit en Pa

Quan la bomba opera en un circuit donat, tindrà el mateix punt d'operació que el circuit que serà el punt d'intersecció entre la corba de la bomba i la corba del circuit.

La potència a l'eix ( $P_{eix}$ ) en kW és la potència necessària que el motor ha de transferir a l'eix de la bomba i es defineix com la relació entre la potència hidràulica i el rendiment de la bomba ( $\eta$ ):

$$P_S = \frac{P_h}{\eta} \quad (\text{Eq.155})$$

Per tal d'escollir la bomba més adient per a un sistema s'han de mirar les seves corbes i escollir la que tingui una corba més propera al punt d'operació requerit pel circuit hidràulic i procurant que els valors dels paràmetres d'operació siguin més elevats que els valors requerits. D'aquesta manera, el potencial del circuit per transportar calor és superior al necessari i la bomba treballarà amb intermitència. El consum energètic de la bomba haurà de ser afegit al consum energètic de l'edifici.

### **DISTRIBUCIÓ D'AIGUA CALENTA**

Els habitatges o edificis poden utilitzar diferents tipus de sistemes d'escalfament, el més populars: aire forçat, calor radiant, hidrònic (base d'aigua calenta) i vapor calent.

### **CONTROLADOR SOLAR**

Els controladors solars regulen el comportament dels sistemes comparant la diferència de temperatura entre el col·lector solar i el dipòsit de calor i activant o desactivant les bombes segons la lectura efectuada.

## **6.2. Control i operació dels sistemes**

### **6.2.1. Modes d'operació de les unitats CHP**

Els diferents modes de les unitats CHP són:

- Mode d'operació per conducció de calor

La variable de control per a aquest mode d'operació és la demanda de calor i l'electricitat generada s'ha d'autoconsumir o bé ser subministrada a la xarxa.

- Mode d'operació per conducció d'electricitat

En aquest mode la variable que controla la potència de sortida de la unitat CHP és la demanda de potència elèctrica i es pot operar de diferents formes:

- En paral·lel amb altres sistemes on la unitat CHP subministra energia als aparells consumidors fins que arriba a la seva capacitat màxima.
- Independentment on la unitat CHP ha de cobrir la demanda dels seus propis consumidors, sovint combinat amb un sistema de bateries.
- Prenent mesures addicionals on la unitat CHP es pot fer servir com a sistema de subministrament d'energia de suport.

Tota la energia tèrmica produïda per la unitat en aquest mode d'operació també s'ha d'aprofitar o emmagatzemar.

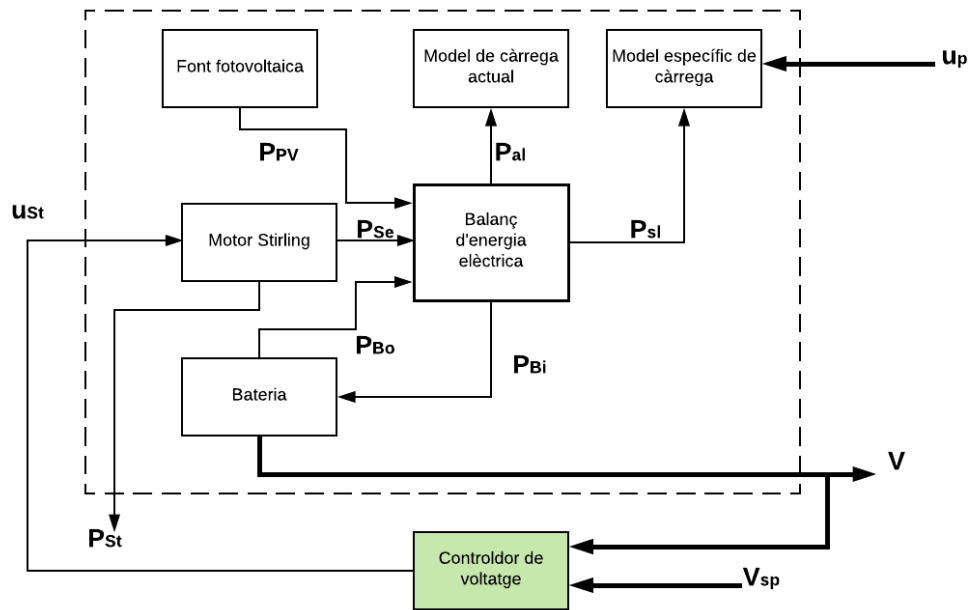
- Modes d'operació combinat
- Impulsat per calor amb funció de pic d'electricitat.
- Demanda màxima d'electricitat i/o calor.
- Demanda mínima d'electricitat i/o calor.

### 6.2.2. Estratègia de control dels sistemes CCHP

La modelització i simulació numèrica d'un sistema mCCHP es basa en:

- El model matemàtic del sistema es defineix a partir dels balanços energètics on les acumulacions principals d'energia al sistema son:
  - l'acumulació d'energia elèctrica a les bateries per a la seva posterior transferència.
  - l'acumulació d'energia tèrmica en un tanc per a la seva posterior transferència.
- El control del procés es duu a terme fent servir el voltatge de l'acumulador d'energia elèctrica i la temperatura del tanc d'acumulació de calor com a valors sensibles al desequilibri entre la potència produïda i la consumida. D'aquesta manera, si la potència produïda és inferior a la consumida el potencial elèctric o tèrmic es redueix i si és superior augmenta. La tasca del sistema de control és la d'ajustar la potència produïda per tal de mantenir constants els valors de les capacitats a través de les quals s'avaluen els potencials elèctric i tèrmic, és a dir, el voltatge i la temperatura. Així s'assoleix l'equilibri entre producció i consum.
- El disseny del sistema mCCHP i l'anàlisi el seu rendiment s'ha de dur a terme durant el règim d'hivern, on l'energia tèrmica es fa servir principalment per escalfar l'edifici i durant el règim d'estiu, on es consumeix principalment pel sistema d'aire condicionat.

El balanç entre la potència produïda i la consumida al subsistema elèctric es realitza a partir d'un llaç de control que ajusta el voltatge de la bateria. El controlador del voltatge fixat al punt  $V^{sp}$  modifica la potència del motor Stirling controlant  $u_{st}$  tal com s'il·lustra a la figura 6.5.



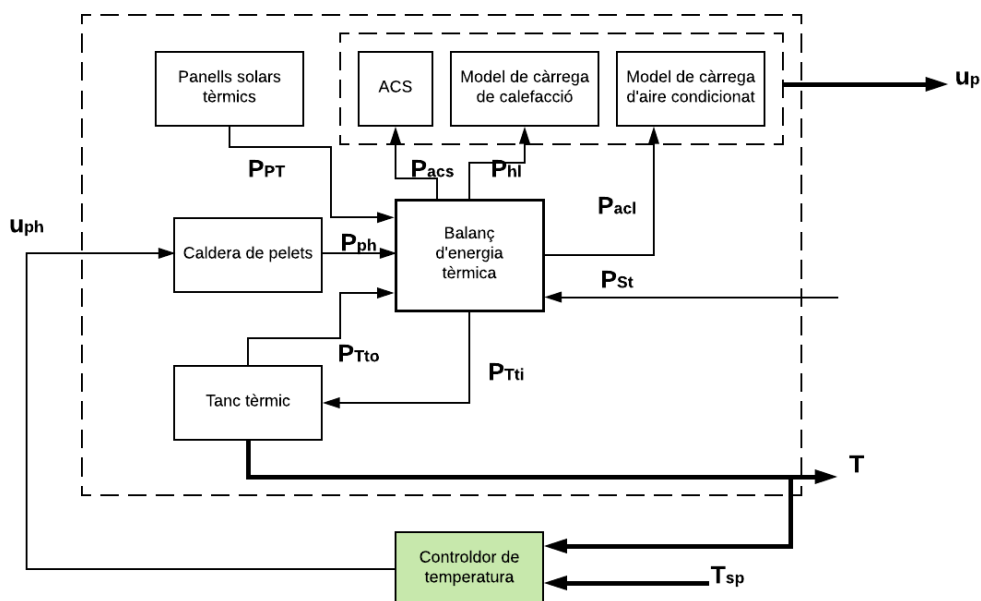
**Figura 6.5:** Balanç de potències al subsistema elèctric  
Font: elaboració pròpia

Les potències i càrregues elèctriques que actuen a la xarxa local són les següents:

Potències elèctriques distribuïdes a la xarxa local	Sigles	Càrregues elèctriques de la xarxa local	Sigles
Potència entregada pel motor Stirling	$P_{se}$	Càrrega útil de l'edifici	$P_{al}$
Potència entregada per la font fotovoltaica (quan el sistema està actiu)	$P_{pv}$	Consum intern del sistema mCCHP, demandat sobretot per l'equip d'aire condicionat	$P_{sl}$
Potència entregada per la bateria (quan les anteriors no poden cobrir tot el consum)	$P_{bo}$	Consum per carregar la bateria quan la potència total entregada per les fonts és major que la requerida	$P_{bi}$

**Taula 6.5:** Potències i càrregues elèctriques a la xarxa local

La potència tèrmica ( $P_{st}$ ) entregada al subsistema tèrmic depèn del control que es faci del motor Stirling a través del controlador de voltatge. Mentrestant, els controls d'engegada i apagada dels components del sistema mCCHP s'inclouen al vector  $u_p$  i determinen el consum propi del sistema. El subsistema elèctric interactua amb el subsistema tèrmic través dels valors de  $P_{st}$  i  $u_p$ .



**Figura 6.6:** Balanç de potències al subsistema tèrmic

Font: elaboració pròpia

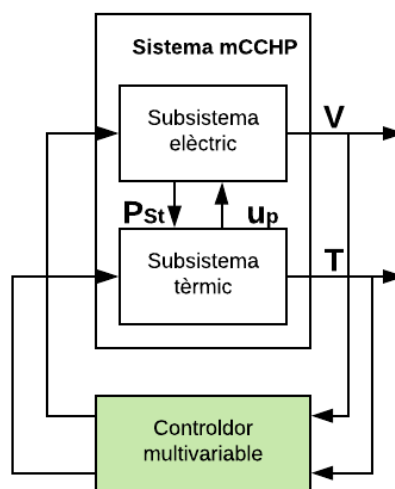
Per a aquest cas, l'energia s'acumula al tanc d'acumulació de calor mantenint la temperatura de l'agent tèrmic a  $T^{sp}$ . El controlador de temperatura regula la variable  $u_{ph}$  per controlar la potència de la caldera de pelets  $P_{ph}$ . Segons el balanç tèrmic de l'edifici, la potència total entregada per les fonts tèrmiques per tal d'obtenir la temperatura desitjada a les habitacions  $T_a$  es determina en les condicions de temperatura exterior més extremes.

Potències tèrmiques distribuïdes a la xarxa local	Sigles	Càrregues tèrmiques de la xarxa local	Sigles
Potència entregada per la caldera de pelets (establida pel controlador de T)	$P_{ph}$	Potència necessària per a escalfar l'edifici durant la temporada freda	$P_{hl}$
Potència del motor Stirling. És una variable aleatòria ja que el sistema manté $P_{st}/P_{se}$ constant i $P_{se}$ varia aleatòriament	$P_{st}$	Potència consumida per l'equip d'aire condicionat durant la temporada calenta	$P_{acl}$
Potència del col·lector solar tèrmic mentre la font està activa	$P_{pt}$	Potència consumida pel circuit d'aigua domèstica	$P_{acs}$
La potència transferida pel tanc tèrmic quan la suma de les potències anteriors no pot cobrir tota la càrrega	$P_{tto}$	Potència consumida per completar l'energia acumulada al tanc tèrmic. Es fa servir per augmentar la temperatura $T$ fins a $T^{sp}$ quan la potència tèrmica total entregada per les fonts és major a la consumida pels aparells	$P_{tti}$

**Taula 6.6:** Potències i càrregues tèrmiques a la xarxa local

Durant el mode d'operació que connecta els dos subsistemes, el subsistema tèrmic queda subordinat a l'elèctric. Les variacions d'energia elèctrica del motor Stirling participen en el procés d'equilibrar la potència produïda i la consumida al subsistema elèctric a través del controlador de voltatge, representen variacions significatives a la potència produïda pel motor. Aquestes variacions s'han de compensar pel sistema de control de temperatura ajustant la potència de la caldera de pelets.

Quan el sistema té una gran càrrega elèctrica i una càrrega tèrmica petita, un sistema de control multivariable com el de la figura 6.7 ha de donar un control més petit al motor Stirling que el que dona un controlador monovariable per tal de reduir l'energia tèrmica dissipada.



**Figura 6.7:** Control de sistema multivariable

Font: elaboració pròpia

Ja que la potència elèctrica entregada pel motor Stirling no cobreix la totalitat de la càrrega es fa servir l'energia de les bateries, tot i que aquesta solució funciona per un període finit de temps i, quan s'esgoten les reserves de les bateries, el motor es fa operar el motor a la seva potència nominal tot i que pot augmentar la calor dissipada.

L'objectiu del control quan s'utilitza un controlador multivariable és minimitzar les pèrdues d'energia tèrmica quan el voltatge i la temperatura es mantenen en un interval donar al voltant dels seus valors nominals.



## 6.3. Anàlisi dinàmic del sistema

### 6.3.1. Principis de la modelització i simulació numèrica

- Les simulacions dels sistemes per a diferents models funcionals es realitzen separatament per els règims d'hivern i d'estiu.
- La càrrega seleccionada pel sistema es compon de dos components:
  - La càrrega elèctrica útil de l'edifici generada pels aparells consumidors (il·luminació, refrigeració...)
  - La càrrega generada pel consum propi de l'equip (bombes, ventiladors...)

La càrrega elèctrica útil es representa amb un diagrama de la potència consumida en 24 h que ha de mostrar els pics de consum situats en hores que s'ajustin a la realitat. El diagrama és igual tant per el règim d'hivern com per el d'estiu. La càrrega elèctrica determinada pel consum propi dels equipaments és un valor variable i la seva evolució amb el temps depèn dels controls donats pels diversos equipaments del sistema.

- La càrrega tèrmica del sistema està formada per dos components:
  - Un component de variació lenta necessari per assolir els valors desitjats de temperatura a l'edifici que modifica en l'escala temporal de l'evolució de les condicions climàtiques i es considerarà constant en la simulació numèrica.
  - Un component de variació ràpida que representa la potència consumida pels circuits d'aigua domèstica. El gràfic de variació d'aquest component en 2 h ha de ser proper a la mitjana del consum de diari de potència en el circuit amb els pics de consum situats en hores que s'ajustin a la realitat i no varia entre el règim d'hivern i el d'estiu.
    - Per tal d'obtenir els règims permanents dins dels processos tèrmics lents en sistemes mCCHP cal realitzar la simulació numèrica del sistema en un interval prou ampli, per exemple, de 3 dies (259.200 s)

### 6.3.2. Simulació dels règim dinàmics

#### SUBSISTEMA ELÈCTRIC

Els components del subsistema elèctric són les bateries, el motor Stirling i les càrregues a més d'un llaç de control del voltatge de la bateria la variable de control del qual és la potència produïda pel motor. El model simplificat de la bateria es considera lineal a partir de la següent expressió:

$$V = V_m + \frac{V_M - V_m}{W_M - W_m} (W - W_m) \quad (\text{Eq.156})$$

On:

$V$  és el voltatge de la bateria en el moment donat

$W$  és l'energia acumulada de la bateria en el mateix moment

$V_M$  i  $V_m$  són els voltatges corresponents als nivells de màxima i mínima energia respectivament

$W_M$  i  $W_m$  són el nivell màxim i mínim d'energia acumulada a la bateria respectivament

La transferència d'energia elèctrica de la font de 230 V i 50 Hz representa la part elèctrica del motor Stirling que s'entrega a la càrrega elèctrica i es duu a terme a través del següent circuit: font (230 V i 50 Hz) → transformador → rectificador → bateria → inversor (230 V i 50 Hz). El rendiment d'aquesta cadena és del 70%.

### 1) El model de les fonts d'energia elèctrica

Les dues fonts d'energia elèctrica principals que es troben als sistemes mCCHP són la part elèctrica del motor Stirling (és la font principal i es controla a partir del voltatge de la bateria) i el sistema fotovoltaic (és la font complementaria i depèn de l'estació de l'any).

### 2) El model de càrrega

El model de la càrrega elèctrica útil ve donat per la variació en la potència consumida durant 24h. La càrrega generada pel consum propi dels equips, també varia en funció de si operen durant el règim d'estiu o d'hivern i el seu anàlisi ha de contemplar les dificultats meteorològiques per a les que s'elaboren els balanços tèrmics de l'edifici.

#### - Components del consum propi de l'equip durant el règim d'hivern

- El règim de consum permanent en condicions meteorològiques adverses, quan la planta de calefacció opera permanentment es compon de:

Consums (càrregues)	Valor en kW
Subsistema elèctric del motor Stirling	0,09
Subsistema elèctric de la caldera de pelets	0,09
Bomba de refrigeració del motor Stirling	0,071
Bomba de recirculació de la caldera de pelets	0,311
Ventilador de refrigeració del motor Stirling	0,340
Bomba utilitzada als convectors per a la circulació d'aigua calenta	0,6
<b>TOTAL</b>	<b>1,573</b>

**Taula 6.7:** Consums [4]

- El consum de la bomba de recirculació d'aigua domèstica quan està operant que és de 0,202 kW.

### - Components del consum propi de l'equip durant el règim d'hivern

- La càrrega permanent:

Consums (càrregues)	Valor en kW
Caldera de pelets	0,09
Bomba de refrigeració pel motor Stirling	0,09
Bomba de recirculació per la caldera de pelets	0,071
Bomba de circulació per la caldera de pelets	0,311
Ventilador de refrigeració del motor Stirling	0,340
<b>TOTAL</b>	<b>0,902</b>

**Taula 6.8:** Consums[4]

- El subsistema de refrigeració:

Consums (càrregues)	Valor en kW
Bomba per l'agent tèrmic del refrigerador	0,26
Bomba d'aigua freda per al circuit del refrigerador	0,27
Bomba per al circuit extern del refrigerador	0,474
Motor de re-refredament	1,2
Refrigerador per adsorció	0,014
<b>TOTAL</b>	<b>2,221</b>

**Taula 6.9:** Consums[4]

El règim d'operació del subsistema de refrigeració (o el del refrigerador d'adsorció) opera de 10 pm a 4 am i de 10 am a 4 pm i resulta en una potència consumida mitjana de 1,109 kW.

- El consum de la bomba per a circulació d'aigua freda als convectors és de 0,6 kW.
- El consum de la bomba de la bomba per a recirculació d'aigua domèstica quan el circuit opera plenament és de 0,202 kW.
- El consum de la bomba per a circulació d'aigua al col·lector solar tèrmic és de 0,2 kW.

### - Control del balanç energètic

La potència mínima del motor Stirling s'ha d'escollir un cop conegudes la potència mitjana consumida al règim hivernal és de  $P_c^w = 3.204 \text{ kW}$  i de  $P_c^s = 3,9 \text{ kW}$  en el règim estival. El valor del límit inferior per aquesta potència és de  $P_{st,e} = 5 \text{ kW}$  i, ja que l'eficiència global és del 70% de la potència produïda pel motor Stirling, la potència útil entregada pel motor és de  $P_{st,u} = 3,5 \text{ kW}$ .

Durant el règim d'hivern també cal contemplar la potència fotovoltaica generada (0,298 kW) que es descarrega directament en la bateria. El rendiment del seu ús és d'un 85% i, la potència mitjana disponible a la càrrega amb origen fotovoltaic és de  $P_{PVu}^w = 0,2533$ . Per tant, la potència mitjana total disponible durant el règim d'hivern és de  $P_d^w = P_{Stu} + P_{wPVu} = 3,753 \text{ kW}$ , valor que supera el de la potència consumida mitjana ( $P_c^w = 3,204 \text{ kW}$ ).

Durant el regim d'estiu, la potència mitjana generada per la font fotovoltaica és de 0,623 kW i la potència útil mitjana a la càrrega és  $P_{PVu}^s = 0,529$  kW. La potència total mitjana disponible en aquest regim serà  $P_d^s = P_{Stu} + P_{PVu}^s = 4,029$  kW, valor superior a la potència consumida mitjana ( $P_c^s = 3,9$  kW).

#### - Simulació numèrica del subsistema elèctric

Pel motor Stirling es pren una constant de temps de 60s que correspon a un regim transitori d'uns 300s, escala de temps per a la qual els règims dinàmics ràpids dels processos elèctrics es poden negligir.

La llei que segueix el llaç de control del voltatge de la bateria pot ser o bé 0/1 o de tipus de control continu. També es pot considerar el cas on el motor Stirling es controla a través de la seva engegada i aturada que correspon a una potència que es trobi entre 0 i  $0,45P_n$  i un control continu que es trobi entre  $0,45P_n$  i  $P_n$ . Per a potències per sota de  $0,45P_n$ , el control del motor es realitza amb un pols 0/1 i modulació PWM amb un període mínim dels impulsos de 30 min i on el temps mínim entre arrancades successives del motor Stirling ve donat per les característiques del motor. Per al llaç de control del voltatge de la bateria es fa servir un controlador de tipus PI. L'eficiència global en l'ús de l'energia elèctrica entregada pel motor Stirling és del 70% i el controlador proveirà controls de tipus PWM en un rang entre 0 i 1,6 kW i controls continus en un rang entre 1,6 i 3,5 kW.

En l'instant de temps inicial d'aquestes simulacions, el valor de l'energia acumulada a les bateries és de 90 MJ i cal considerar que representen la simulació del subsistema elèctric sense tenir en compte la càrrega real i negligint el consum propi de l'equipament.

### SUBSISTEMA TÈRMIC

El model matemàtic del subsistema tèrmic es determina segons els balanços del tanc d'acumulació i de l'edifici, quedant l'equació del balanç tèrmic de l'acumulador tèrmic de la següent manera:

$$m_w c_w \frac{dT_c}{dt} = P_{Stir} + P_{pel} - P_{tv} - P_{am} \quad (\text{Eq.157})$$

On:

$m_w$  és la massa d'aigua acumulada al tanc

$c_w$  és la calor específica de l'aigua

$T_c$  és la temperatura de l'aigua acumulada al tanc

$P_{Stir}$  és la potència tèrmica del motor Stirling

$P_{pel}$  és la potència entregada per la caldera de pelets

$P_{tv}$  és la potència consumida a l'edifici per cobrir les pèrdues per transmissió i ventilació

$P_{am}$  és la potència consumida al circuit d'aigua domèstica

El balanç entre la potència tèrmica entregada pel motor Stirling i la caldera de pelets i la consumida per a calefacció i per a escalfament d'aigua s'assoleix a través del control de la temperatura d'aigua del tanc, sent el punt de referència  $T_c^{ref}$ . La potència tèrmica del motor Stirling és un valor aleatori donat pel controlador de voltatge i el control de temperatura de l'agent tèrmic al tanc d'acumulació es realitza a partir del control de potència de la caldera de pelets.

L'equació del segon balanç tèrmic és la següent:

$$m_a c_a \frac{dT_a}{dt} = k_c (T_c - T_a) - P_{tv} \quad (\text{Eq.158})$$

On:

$m_a$  és la massa d'aire en l'edifici

$c_a$  és la calor específica de l'aire en l'edifici

$k_c$  és el coeficient de transferència per convecció

$P_{tv}$  és la potència consumida a l'edifici per compensar les pèrdues per transmissió i ventilació

#### - Model de les fonts d'energia tèrmica

Durant el regim d'hivern actuen tant el motor Stirling com la caldera de pelets. La potència tèrmica del motor ( $P_{St,th}$ ) és tres cops major que la seva potència elèctrica i presenta una evolució aleatòria. La caldera de pelets, en canvi, es controla a través d'un controlador de temperatura que s'encarrega de mantenir constant la temperatura de l'agent tèrmic al tanc d'acumulació. El control s'efectua per tal de mantenir la temperatura al seu valor de referència i compensar les variacions de potència del motor Stirling.

Ambdues fonts transfereixen la calor al tanc d'acumulació per ser finalment distribuïda cap a la càrrega tèrmica. La temperatura al tanc d'acumulació es veu afectada per la diferència entre la potència produïda i la consumida i el sistema regula la temperatura per tal d'eliminar aquesta diferència.

Durant el regim d'estiu també es fa ús dels col·lectors solars tèrmics com a font de calor entre les 6 am i les 6 pm.

#### - Model de càrrega

Durant el regim d'hivern la càrrega tèrmica es compon de la potència necessària per l'edifici i de la potència consumida per escalfar l'aigua domèstica.

Durant el regim d'estiu, la càrrega tèrmica es compon principalment per l'equip d'aire condicionat i, en un segon pla pel circuit d'aigua domèstica.

#### - Control de l'equilibri energètic

La càrrega mitjana màxima i mínima es pren com a criteri de selecció per determinar la potència necessària de la caldera de pelets.

En alguns moments és possible que el valor instantani de la càrrega superi el de la potència tèrmica produïda. Per veure si la desviació de la temperatura del col·lector respecte al seu valor de referència es produeix dins d'un interval admissible cal observar la simulació del sistema en regim dinàmic.

- **Simulació numèrica del subsistema tèrmic**

L'anàlisi de la simulació en regim dinàmic es realitza en un interval de 24 hores tal i com en el cas del subsistema elèctric i considerant el regim d'hivern.

La caldera de pelets, es controla pel controlador de temperatura amb una constant de temps de 100 segons.

El balanç tèrmic de l'edifici té dos variables: la temperatura a dins de l'edifici ( $t_a$ ) i les pèrdues de potència a través de transmissió i ventilació ( $P_{tv}$ ).

Aquest balanç tèrmic permet el càlcul del balanç tèrmic per tal d'obtenir la potència  $P_{tv}$  a partir de la temperatura de l'aire dins l'edifici ( $t_a$ ), la temperatura del medi extern ( $t_e$ ), la temperatura de la bodega ( $t_p$ ), la temperatura del sòl ( $t_s$ ) i la temperatura del sostre ( $t_{tav}$ ).

### 6.3.3. Conclusions

Pel que fa a l'equip d'aire condicionat, un regim d'operació del subsistema elèctric correcte necessita una potència entregada pel motor Stirling superior a 5 kW, el que porta a una potència tèrmica entre 18 i 20 kW. Tot i que les instal·lacions d'aire condicionat que utilitzen equipament elèctric són millors pel que fa al consum energètic cal considerar els aspectes qualitatius del procés de condicionament d'aire. El condicionament a partir d'equipament d'adsorció té avantatges com per exemple el confort tèrmic.

La manca de fonts d'energia renovables afecta al marge de seguretat que cal tenir per tal de compensar les càrregues i a més a més, comporta un augment en el consum de combustible (biogàs o pelets).

El potencial del dèficit d'energia és més important al subsistema elèctric que al tèrmic i, per tant, cal fer ús d'una font fotovoltaica.

## 6.4. Disseny del subsistema de control

La opció més simple per al subsistema de control és un control d'engegada i aturada. Per exemple, si el sistema es compon d'una bateria de 48 V i amb una valor de referència  $V^{ref} = 48,4$  V, sorgeix el problema de determinar el control dels llindars de commutació:  $V^{ref} + \epsilon_1$  al canviar d'1 a 0 i  $V^{ref} - \epsilon_2$  al canviar de 0 a 1 ( $\epsilon_1=0,2$  i  $\epsilon_2=0,4$  determinen la amplitud i el període de l'oscil·lació de temperatura en el regim de control d'engegada i aturada i cal reduir aquesta amplitud quan el

període d'oscil·lació no arriba al límit marcat per les especificacions del motor). L'amplada de la histèresi,  $\varepsilon_1$  i  $\varepsilon_2$  del controlador d'engegada i aturada s'estableix experimentalment durant la posada en marxa del sistema.

El control continu és subministrat per un controlador PI equipat amb un mecanisme que no deixa que acabi.

El control del motor Stirling amb un llaç de control del voltatge de la bateria es pot aconseguir amb un controlador d'engegada i aturada quan la càrrega es troba per sota del llindar  $P_1$  i amb control continu quan no o amb un control PWM quan la càrrega pertany al domini  $P_1, \dots, P_{\max}$ .

## 7. Cas d'aplicació

Aquesta part del treball consisteix en la implantació d'un sistema basat en les i les tecnologies fins ara explicades al cas d'una vivenda unifamiliar. Es farà d'acord a les metodologies detallades als punts 5 i 6, per tant, primer es realitzarà el disseny estructural del sistema i, posteriorment, el disseny funcional.

Tal com es detallarà més endavant, la solució adaptada per cobrir la demanda d'energia de la casa consisteix en l'ús de panells fotovoltaics i una unitat CHP impulsada per un motor Stirling per cobrir la demanda d'energia elèctrica i l'ús de panells solar tèrmics, la calor generada per la unitat CHP i una caldera de suport per satisfer la demanda tèrmica. La demanda de fred vindrà coberta per un refrigerador per compressió tèrmica d'adsorció.

El sistema operarà de tal manera que segons l'energia elèctrica generada pels panells fotovoltaics produirà l'energia elèctrica necessària a la unitat de cogeneració per tal d'igualar la demanda d'energia elèctrica. La demanda d'energia tèrmica es cobrirà a partir de la calor recuperada de la unitat CHP, la generada pels panells solar tèrmics i, quan sigui necessari, una caldera de suport.

### 7.1. Marc de treball conceptual

El cas d'aplicació que es duu a terme en aquest projecte consisteix en la implantació d'un sistema mCCHP-SE-RES destinat a cobrir les necessitats energètiques d'un habitatge concret de manera eficient. El procés de disseny es durà a terme seguint les metodologies explicades a la memòria.

El marc de treball conceptual es compon de les restriccions i les demandes donades per l'emplaçament de l'habitatge, els habitants i els recursos econòmics disponibles alhora de construir el sistema. L'objectiu del sistema és el de garantir les condicions de confort adients per als ocupants de l'habitatge a través del subministrament d'energia elèctrica, de calor i de fred de la manera més eficient i més neta possible i conté els següents punts:

- Anàlisi de les necessitats locals de l'habitatge
- Estudi de la legislació aplicable al lloc d'implantació per tal de construir el sistema d'acord amb les normatives vigents.
- Anàlisi de les necessitats locals per a la implementació del sistema.

#### 7.1.1. Estudi de la normativa aplicable

És important conèixer la normativa vigent per tal d'actuar d'acord a ella i poder realitzar el projecte sense problemes. La legislació que fa referència a la microcogeneració a nivell europeu és la Directiva 2004/8/CE, relativa al foment de la cogeneració sobre la base de la demanda de calor



útil al mercat interior de l'energia. A nivell espanyol, en canvi, està en vigor el RD 616/2007, relatiu al foment de la cogeneració d'alta eficiència.

Pel que fa concretament a la microcogeneració en edificis, a nivell europeu s'aplica la Directiva 2010/31/UE relativa a l'eficiència energètica dels edificis i a nivell espanyol cal respectar el Codi Tècnic d'edificació (CTE) [27] i el Reglament d'Instal·lacions Tèrmiques en Edificis (RITE) [28].

El RITE exigeix un aportament mínim d'energia solar a la producció d'ACS a calcular mitjançant l'HE4 [29]; una de les exigències bàsiques d'estalvi energètic que defineix. Tot i així, es permeten excepcions al compliment en el cas de la microcogeneració si es justifica l'alternativa dissenyada.

### **7.1.2. Anàlisi de les necessitats locals**

Aquest anàlisi es realitza per tal de definir l'emplaçament exacte del sistema i la topologia dels components que el formen. En el moment d'aquesta presa de decisió cal tenir en compte la localització de les fonts d'energia de les que el sistema en farà ús i es farà des dels següents punts de vista:

- Segons el sistema de distribució d'energia integrat a l'edifici.
- Des d'un punt de vista funcional; es representarà pel grau de complexitat i de l'eficiència energètica
- Com no pot ser de cap altra manera, caldrà respectar els límits arquitectònics de l'habitatge i la normativa.

Per a un sistema com el que es vol implantar es poden fer servir refrigeradors basats en tecnologies tant d'absorció com d'adsorció però es farà servir un d'adsorció ja que aquests no emeten gasos tòxics i es poden instal·lar dins de la vivenda.

## **7.2. Pla de negoci del fabricant**

L'opció escollida ha estat la de l'adquisició de components d'ús general per al muntatge del sistema en la residència seleccionada. Els components necessaris es seleccionaran entre els models disponibles al mercat basant-se en la seva idoneïtat per al sistema que es vol construir i la seva relació qualitat-preu.

### **7.3. Presa de dades inicial**

Per tal de que el sistema funcioni adequadament, cal dissenyar-lo d'acord amb les característiques de l'habitatge i el seu entorn, per tant, s'ha de recollir informació sobre:

- Les característiques arquitectòniques de la residència
- Les necessitats i els requeriments dels habitants
- Les necessitats funcionals de la residència

- L'entorn energètic de la residència

### 7.3.1. Característiques de l'habitatge

#### Localització

L'habitatge per al qual es dissenyarà el sistema mCCHP és una vivenda unifamiliar situada al carrer únic Baltarga de l'entitat de població de Baltarga (42° 36'' N i 1° 82'' E) que pertany al municipi de Bellver de Cerdanya, província de Lleida. Està situat en els Pirineus catalans, a 1080 metres d'alçada i la seva principal via de comunicació és l'N-1411. La ubicació de la vivenda està senyalada a les figures 7.1 i 7.2 amb un marcador de color gris.



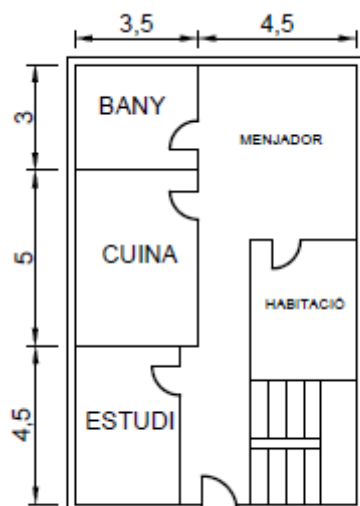
Figura 7.1: Vista en Google Earth de la casa[30]



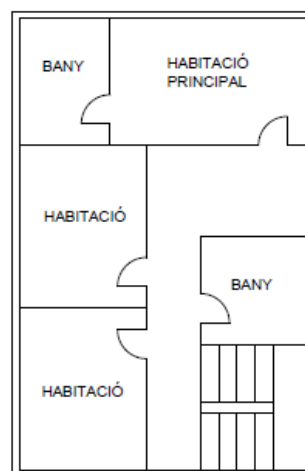
Figura 7.2: Vista en Google Maps de la casa [30]

### Plànols de la casa

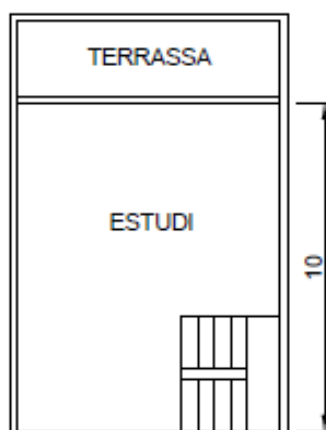
La casa disposa de tres plantes: planta baixa, primer pis i àtic. La figures 7.3.1, 7.3.2 i 7.3.3 realitzades amb el programa AutoCAD representen les distribucions de la planta baixa i el primer pis respectivament:



**Figura 7.3. 1:** Planta baixa



**Figura 7.3.2:** Primer pis



**Figura 7.3.3:** Àtic

### Elements arquitectònics característics

L'habitatge disposa d'una superfície total (TFA) de 280 m<sup>2</sup> distribuïts entre les tres plantes. Les parets exteriors es componen d'una estructura de marc de formigó amb recobriment BCA i

aïllament tèrmic de poliestirè expandit de 15 cm. La planta baixa i el primer pis disposen de 100 m<sup>2</sup> i una alçada de 3,05 m mentre que l'àtic té una superfície de 80 m<sup>2</sup> i una alçada de 2,75 m.

### **7.3.2. Necessitats i requeriments dels habitants**

Les necessitats i els requeriments dels habitants de la residència determinen les funcions que ha de complir la casa, en aquest cas, a través del sistema mCCHP. Per tal de complir amb les demandes habituals per a aquest tipus de sistemes, el sistema haurà de cobrir les necessitats funcionals de l'habitatge i ser fàcilment accessible, silencios i fàcil d'operar. A més a més, els seus components no han d'ocupar un espai útil per tal de no molestar.

La casa en qüestió té una demanda d'energia tèrmica major que la d'energia elèctrica, per tant, un dels requeriments específics és la no-connexió de l'habitatge a la xarxa elèctrica. També s'ha decidit la utilització d'un refrigerador per compressió tèrmica (TCC).

La potència instal·lada a la casa és de 10 kW.

### **7.3.3. Necessitats funcionals de l'habitatge**

La casa consumeix energia per a diversos usos que van des de la climatització (calefacció i refrigeració), la ventilació, el consum per part dels electrodomèstics i la il·luminació a la producció d'ACS.

#### **Distribució de l'energia tèrmica**

El sistema de calefacció escollit funciona a partir d'aigua calenta en una estació tèrmica pròpia formada per: energia no convencional, distribució bi-tubular mixta i radiadors de placa d'acer esmaltat o equivalents en banys i cuines i convectors de ventilació en algunes habitacions.

El sistema de calefacció comença amb els col·lectors. Les toveres d'anada i de tornada es distribueixen en circuits paral·lels, tots dos soterrats. Un circuit bi-direccional de ventiladors convectors opera durant el regim d'hivern amb aigua calenta entre 60 i 80°C per escalfar la casa i, durant el regim d'estiu, opera amb aigua freda entre 5 i 15°C per refredar-la. Un control electrònic amb electrovàlvules regula l'operació d'aquests circuits per que operi d'acord amb les necessitats de fred o calor en cada moment.

#### **Aplicacions sanitàries**

L'aigua freda utilitzada pel sistema prové de la xarxa d'aigua potable de la localitat i l'aigua calenta que es faci servir s'escalfarà a la pròpia casa.

L'aigua, tant calenta com freda, es distribueix a través d'una xarxa muntada al pis soterrani connectada als eixos verticals que subministren els consumidors.

## Electrodomèstics i sistemes elèctrics

Com s'ha definit anteriorment, la casa té una potència instal·lada de 10 kW per satisfer la demanda dels aparells que conté que funcionen amb energia elèctrica. El sistema mCCHP disposa d'un sistema de bateries i la distribució de l'energia elèctrica als aparells consumidors es fa mitjançant conductors de coure aïllats amb PVC per als aïllaments interns o protegits per un tub de protecció incrustat per als elements de construcció.

El sistema elèctric es controla a partir d'interruptors i comandaments muntats dins de capses de protecció integrades en els elements de construcció o, per a algunes àrees, amb sensors de moviment.

### 7.3.4. Entorn energètic de l'habitatge

#### Clima local

El clima a la zona on es situa l'habitatge és Mediterrani, de tipus Pirinenc Occidental amb unes precipitacions mitjanes anuals que poden anar des de 700 mm fins a 1000 mm. Els hiverns són molt freds i els estius suaus, amb una alta amplitud tèrmica anual i diària.

L'energia que consumeix la casa depèn en gran mesura dels factors climàtics que tenen lloc al seu voltant:

- La temperatura de l'aire
- La humitat
- La velocitat del vent
- La radiació solar que li arriba

Les dades climàtiques han estat obtingudes de la base de dades de l'Institut Català d'Energia (ICAEN) [12] i del mapa interactiu del web PVGIS [9].

És important conèixer el valor de la irradiació rebuda per estimar l'ús que es farà del recurs solar. Com que és impossible saber exactament els seus valors en el futur cal consultar els valors registrats per als últims anys per tal d'estimar els valors que prendran. Aquestes dades serviran per establir l'energia d'entrada al sistema d'origen solar, per dimensionar la instal·lació d'aire condicionat que opera durant l'època càlida i per ajustar la calor necessària per calefacció.

Mes	Irradiació horitzontal solar diària (kWh/m <sup>2</sup> /d)	Graus dia de calefacció (°C-d)	Graus dia de refrigeració (°C-d)
Gener	1,96	514	0
Febrer	2,96	409	0
Març	4,46	370	0
Abril	4,85	312	0
Maig	5,71	208	2
Juny	6,69	119	22
Juliol	6,81	66	52
Agost	5,89	77	46
Setembre	4,72	185	5
Octubre	3,31	256	0
Novembre	2,14	391	0
Desembre	1,64	497	0
<b>Anual</b>	<b>4,26</b>	<b>3.404</b>	<b>127</b>

Taula 7.1: Irradiació horitzontal diària, HDD i CDD de la localitat escollida

### Recursos i fonts d'energia locals

#### Potencial d'energia solar del territori

El potencial d'energia solar per a Catalunya es troba al voltant d'uns 5.292,5 MJ/m<sup>2</sup>/any o 1.460 kWh/m<sup>2</sup>/any.

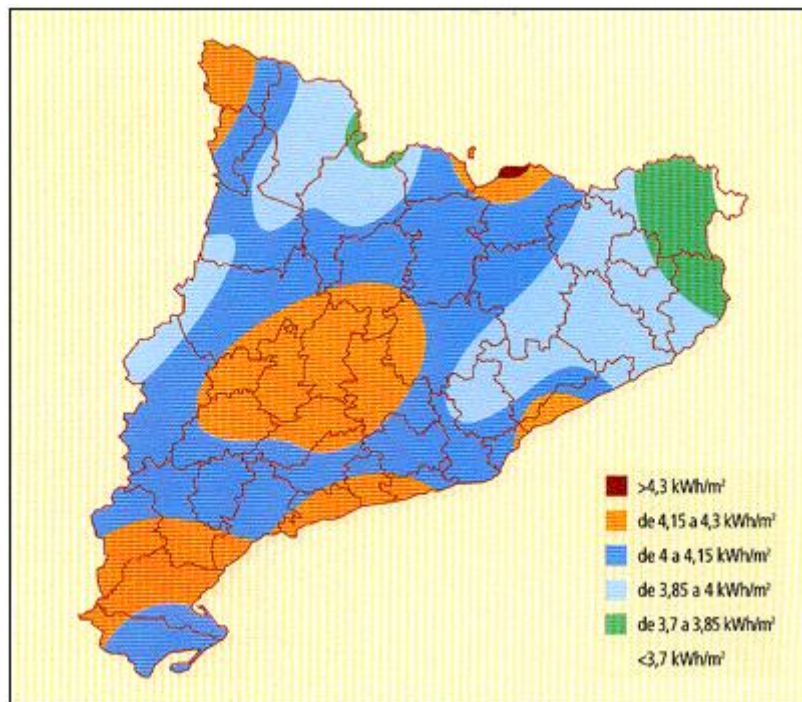
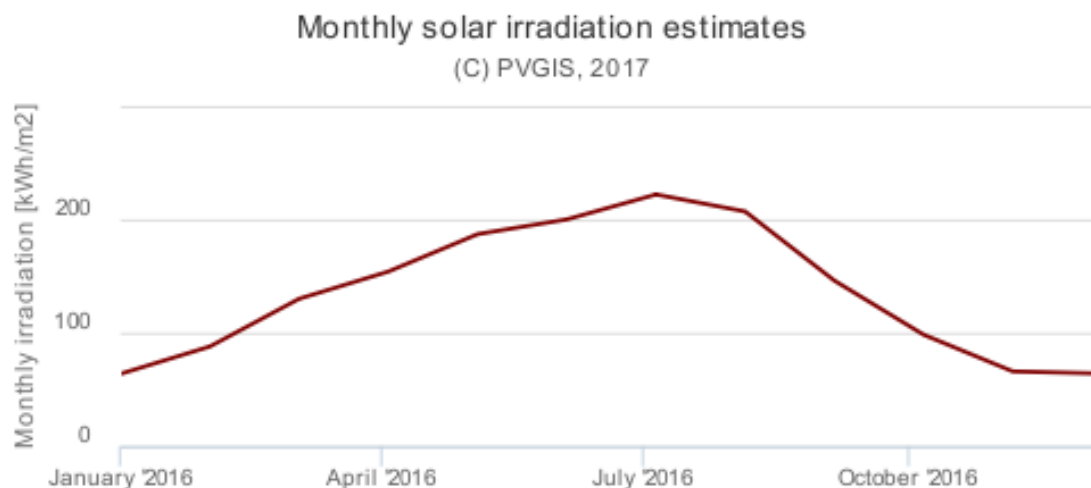


Figura 7.4: Potencial d'energia solar a Catalunya, Font:ICAEN [12]

### Potencial d'energia solar de l'habitatge

A partir del web PVGIS, s'han obtingut les dades corresponents a la radiació solar per a la localització de l'habitatge. La figura 7.5 representa aquests valors de manera gràfica per al període de l'any 2016 ja que és l'any més recent per al qual existeixen dades disponibles.



**Figura 7.5:** Irradiació mensual a l'any 2016 per a la localitat escollida. Font: PVGIS

A partir dels valors de la irradiació i les equacions 55-72, s'ha calculat la producció d'energia tèrmica i elèctrica per part tant dels panells fotovoltaics com dels panells solars tèrmics.

En primer lloc cal conèixer una sèrie de característiques alhora de calcular l'energia produïda pels dos tipus de panells en el sistema dissenyat. La superfície de terrat destinada als panells fotovoltaics és  $A_{PV}^r = 12,3 \text{ m}^2$  ja que el factor  $k_{PV}^r$  s'ha estimat de 0,123 i l'àrea de la planta baixa ( $A_{GFA}$ ) és de  $100 \text{ m}^2$ . Pel que fa als panells solars tèrmics, se'ls hi destina una superfície de terrat de  $18 \text{ m}^2$  ja que el factor  $k_{ST}^r$  s'ha estimat de 0,18 i l'àrea de la planta baixa ( $A_{GFA}$ ) és de  $100 \text{ m}^2$ . També cal considerar els rendiments dels panells que són del 15% en el cas dels panells fotovoltaics i del 70% en el cas dels panells solars tèrmics. Degut als factors que causen una reducció en l'exposició dels panells a la radiació solar, el rendiment solar al terrat ( $Y_r$ ) es considera del 80%.

Els resultats obtinguts per a la producció mensual específica d'energia elèctrica i energia tèrmica tant relativa als panells com a l'habitatge venen recollits a la taula 7.2:

Mes	Irradiància horitzontal solar diària (kWh/m <sup>2</sup> /d)	producció mensual específica d'energia elèctrica i energia tèrmica dels panells		producció mensual específica d'energia elèctrica i energia tèrmica de l'habitatge	
		$e_{PV}^r$ (kWh/m <sup>2</sup> <sub>panell</sub> )	$q_{ST}^r$ (kWh/m <sup>2</sup> <sub>panell</sub> )	$e_{PV}$ (kWh/m <sup>2</sup> <sub>TFA</sub> )	$q_{ST}$ (kWh/m <sup>2</sup> <sub>TFA</sub> )
Gener	1,96	7,29	34,03	0,32	2,19
Febrer	2,96	9,95	46,41	0,44	2,98
Març	4,46	16,59	77,43	0,73	4,98
Abril	4,85	17,46	81,48	0,77	5,24
Maig	5,71	21,24	99,13	0,93	6,37
Juny	6,69	24,08	112,39	1,06	7,23
Juliol	6,81	25,33	118,22	1,11	7,60
Agost	5,89	21,91	102,25	0,96	6,57
Setembre	4,72	16,99	79,30	0,75	5,10
Octubre	3,31	12,31	57,46	0,54	3,69
Novembre	2,14	7,70	35,95	0,34	2,31
Desembre	1,64	6,10	28,47	0,27	1,83
<b>Anual</b>	<b>4,26</b>	<b>186,66</b>	<b>871,08</b>	<b>8,20</b>	<b>56,00</b>

Taula 7.2: Producció fotovoltaica i solar tèrmica

#### 7.4. Modelització estructural del sistema

Per tal de satisfer aquestes necessitats cal fer ús de diferents electrodomèstics, un refrigerador tèrmic per compressió (TCC), radiadors, escalfadors i instal·lacions domèstiques. Els consums produïts per la pròpia operació del sistema s'agregaran als de l'habitatge ja que també cal tenir-los en compte a nivell elèctric i tèrmic. Per tal de cobrir els consums es farà ús de tres sistemes d'emmagatzematge: el d'energia elèctrica, el de calor i el de fred. Quan la quantitat d'energia emmagatzemada dins de qualsevol d'aquests sistemes estigui per sota del nivell establert se li subministrarà energia per tal d'arribar al límit d'energia emmagatzemada acceptable.

Els aparells subministradors d'energia en el sistema seran:

- Els panells fotovoltaics
- El motor Stirling (actuant com a unitat CHP)
- Una caldera de suport
- Els panells solars tèrmics

#### 7.5. Estimació del consum

El consum global de la residència fa referència a l'energia consumida en la totalitat de l'habitatge i, dividint aquest valor per la TFA s'obté el consum específic de la residència. Per tal d'obtenir



valors totals cal començar per estimar el consum de cada funció que es cobreix segons la forma d'energia consumida.

### 7.5.1. Estimació de la calor i el fred que cal generar a l'habitatge

És necessari conèixer el coeficient global de transferència de calor de la casa per tal de determinar aquests paràmetres. Primer cal identificar les rutes per les quals es perd la calor en l'habitatge i ajuntar-los per tal de determinar el coeficient de pèrdua de calor (UA). Aquestes rutes passen a través dels elements que recobreixen la casa, del sòl o es produeixen a través de l'intercanvi d'aire entre l'interior i l'exterior (infiltracions).

Les pèrdues de calor més significatives es produeixen a través de les parets, el sostre, les finestres i el sistema de ventilació, per tant, cal identificar tots aquests elements en la casa. Els elements del recobriment de la casa i les seves característiques venen recollits a la taula 7.3. A més a més, a partir de les equacions 76 i 77 es poden calcular els coeficients de pèrdua de calor globals (U).

Tipus de capa	Gruix (mm)	Conductivitat (W/m°C)	Valor (m²°C/W) R	Valor (W/m²°C) U
Ciments			2,21	<b>0,45</b>
Terra compacta	1.500	0,83	1,81	
Formigó armat sec	100	0,75	0,13	
Paviment del sòl	15	0,055	0,27	
Parets			4,58	<b>0,21</b>
Guix exterior	10	0,43	0,02	
Aïllament de poliestirè	150	0,03	3,33	
Formigó armat	400	0,33	1,21	
Guix interior	10	0,43	0,02	
Sostres			2,62	<b>0,38</b>
Falca d'aire	150	5,56	0,06	
Plats de fibra de vidre	50	0,04	2,5	
Guix interior/intern	10	0,43	0,04	
Plats de ceràmica	30	1,59	0,02	
Portes i finestres				<b>1,4</b>

**Taula 7.3:** Característiques dels materials arquitectònics

Un cop identificats aquests elements i les seves característiques i calculats els valors U, es poden identificar les diferents rutes de pèrdua de calor per tal de calcular el coeficient de pèrdua de calor UA, que serà la suma dels productes del valor U de cada element per l'àrea que aquest ocupi.

Coeficient de transferència de calor dels elements de recobriments				
Elements		Valor U (W/m <sup>2</sup> °C)	Àrea (m <sup>2</sup> )	UA (W/°C)
S	Parets	0,21	37,2	7,812
	Finestres	1,4	32	44,8
E	Parets	0,21	33	6,93
	Finestres	1,4	6,2	8,68
N	Parets	0,21	61,8	12,978
	Finestres	1,4	6,2	8,68
O	Parets	0,21	41,1	8,631
	Finestres	1,4	3,9	5,46
	Sostre	0,38	240	91,2
UA <sub>recobriments</sub> (W/°C)				195,17
Pèrdues de calor per infiltracions				
Capacitat de calor volumètric de l'aire (Wh/m <sup>3</sup> °C)			1,16	
Volum de la casa aproximat (m <sup>3</sup> )			700	
Canvis d'aire horaris (h <sup>-1</sup> )			0,2	
UA <sub>infiltracions</sub> = CCV·V·CAH (kW/°C)				162,4
Pèrdues de calor perimetral				
Coeficient de pèrdua de calor, F (W/m <sup>2</sup> °C)			0,48	
Longitud del perímetre de la casa, P (m)			45,65	
UA <sub>perímetre</sub> = F·P (W/°C)				21,91
UA (W/°C)				<b>379,48</b>

Taula 7.4: Valors UA

Un cop conegut el valor UA global i fent ús de les equacions 88 i 89 s'obtenen els valors anuals corresponents a la quantitat de calor necessària per a calefacció i per a refrigeració:

<b>Q<sub>calefacció,anual</sub> (kWh/any)</b>	31.002,24
<b>Q<sub>refredament,anual</sub> (kWh/any)</b>	1.156,66

Taula 7.5: Taula de resultats

### 7.5.2. Estimació analítica del consum de calor en la producció d'ACS

Considerant la diferència de temperatura entre l'aigua calenta i l'aigua freda com a  $\Delta\theta=50^{\circ}\text{C}$ , per a una casa ocupada per 5 persones, estimant un consum de 50l d'aigua diaris per persona i coneixent la calor específica de l'aigua (4,186 J/g °C), a partir de l'equació 99 es pot calcular la quantitat de calor consumida per a la producció d'ACS.

<b>Q<sub>ACS</sub> (kWh/any)</b>	5.306,44
----------------------------------	----------

Taula 7.6: Taula de resultats

### 7.5.3. Estimació analítica de la potència elèctrica global consumida per les instal·lacions domèstiques

A partir de l'equació 100 es calcula el consum d'energia elèctrica anual per il·luminació que tindrà la residència.

Les dades que cal tenir en compte són:

- Potència nominal instal·lada,  $P_n = 10 \text{ kW}$
- Factor d'il·luminació constant,  $F_c = (1 + MF)/2 = 0,9$
- Factor de manteniment,  $MF = 0,8$
- Temps d'operació anual,  $t_o = 2.500 \text{ h}$
- Temps d'ús durant la nit,  $t_N = 250 \text{ h}$
- Temps d'ús diari,  $t_D = t_o - t_N = 2.250 \text{ h}$
- $F_{OC} = 0,8$  per al sistema escollit
- Factor d'absència,  $F_A = 0,5$
- Factor de dependència de l'ocupació  $= F_{OC} + 0,2 - F_A = 0,5$
- Factor de subministrament durant el dia,  $F_{DS} = a + b \cdot \text{latitud}$

$F_{DS} = 1,3097 - 0,0106 \cdot 43,36 = 0,86$ . Els coeficients  $a$  i  $b$  prenen els valors anteriors per a una penetració de llum mitjana amb una luminància propera a 300 lux i l'expressió només és vàlida per a latituds compreses entre  $38^\circ$  i  $60^\circ \text{ N}$ .

- Factor de redistribució mensual,  $C_{DS} = 1$
- Factor d'impacte,  $F_{DC} = 0,3$  per a un control del sistema mitjà i manual
- Factor de dependència de la llum diària,  $F_D = 1 - (F_{DS} \cdot F_{DC} \cdot C_{DS}) = 0,742$

S'ha menyspreat el valor de l'energia paràsita del sistema.

$E_{L,t} \text{ (kWh/any)}$	8.637,75
-----------------------------	----------

**Taula 7.7:** Taula de resultats

### 7.5.4. Determinació del consum específic

Un cop coneguts els consums anuals de calor, fred i electricitat, el seu valor específic s'obté dividint aquests valors entre la TFA. El consum anual específic d'electricitat s'ha determinat a partir del consum global de potència per instal·lacions i el consum anual per electrodomèstics que segons dades estadístiques del consum de diferents electrodomèstics obtingudes d'IDAE [31] s'ha estimat com a 2.000 kWh/any.

Consum de calor anual específic per a calefacció, $q_h \text{ (kWh/m}^2 \text{ any)}$	110,72
Consum de calor anual específic per a refrigeració, $q_c \text{ (kWh/m}^2 \text{ any)}$	4,13
Consum de calor anual específic per ACS, $q_h \text{ (kWh/m}^2 \text{ any)}$	18,95
Consum anual específic d'electricitat $e \text{ (kWh/m}^2 \text{ any)}$	37,99

**Taula 7.8:** Taula de resultats

Els valors de consum específic per a les diferents formes d'energia permeten classificar energèticament la vivenda:

Consum específic anual	Classificació energètica		Energia específica de la vivenda	Classificació energètica
	A	B		
Calefacció (kWh/m <sup>2</sup> any)	70	117	110,72	B
Refrigeració (kWh/m <sup>2</sup> any)	20	50	4,13	A
Escalfament d'aigua (kWh/m <sup>2</sup> any)	15	35	18,95	B
Il·luminació (kWh/m <sup>2</sup> any)	40	49	37,99	A

**Taula 7.9:** Classificació energètica

A partir dels valors dels consums d'energia específics i dels indicadors dels graus-dia de calefacció i de refrigeració és possible determinar el consum específic mensual per a les diferents formes d'energia a partir de les equacions 103-106.

Mes	HDD (°C-d)	CDD (°C-d)	Calor (kWh/m <sup>2</sup> )	Fred (kWh/m <sup>2</sup> )	ACS (kWh/m <sup>2</sup> )	Electricitat (kWh/m <sup>2</sup> )
Gener	514	0	16,72	0,00	1,58	3,17
Febrer	409	0	13,30	0,00	1,58	3,17
Març	370	0	12,04	0,00	1,58	3,17
Abril	312	0	10,15	0,00	1,58	3,17
Maig	208	2	6,77	0,07	1,58	3,17
Juny	119	22	3,87	0,72	1,58	3,17
Juliol	66	52	2,15	1,69	1,58	3,17
Agost	77	46	2,50	1,50	1,58	3,17
Setembre	185	5	6,02	0,16	1,58	3,17
Octubre	256	0	8,33	0,00	1,58	3,17
Novembre	391	0	12,72	0,00	1,58	3,17
Desembre	497	0	16,17	0,00	1,58	3,17
<b>Anual</b>	<b>3404</b>	<b>127</b>	<b>110,72</b>	<b>4,13</b>	<b>18,95</b>	<b>37,99</b>

**Taula 7.10:** Consums mensuals

### 7.5.5. Agregació del consum

Les necessitats funcionals de la residència es satisfan a través de la incorporació d'elements consumidors d'energia al sistema com electrodomèstics, radiadors, refrigeradors, escalfadors o instal·lacions domèstiques.

La càrrega tèrmica del sistema mCCHP ha de cobrir el consum de calor de l'habitatge així com el consum de calor per a refrigeració que dependrà del COP<sub>a</sub> del refrigerador per compressió tèrmica utilitzat (0,6). El consum d'electricitat mensual de la residència no presenta grans diferències al llarg de l'any, per tant es considerarà constant.

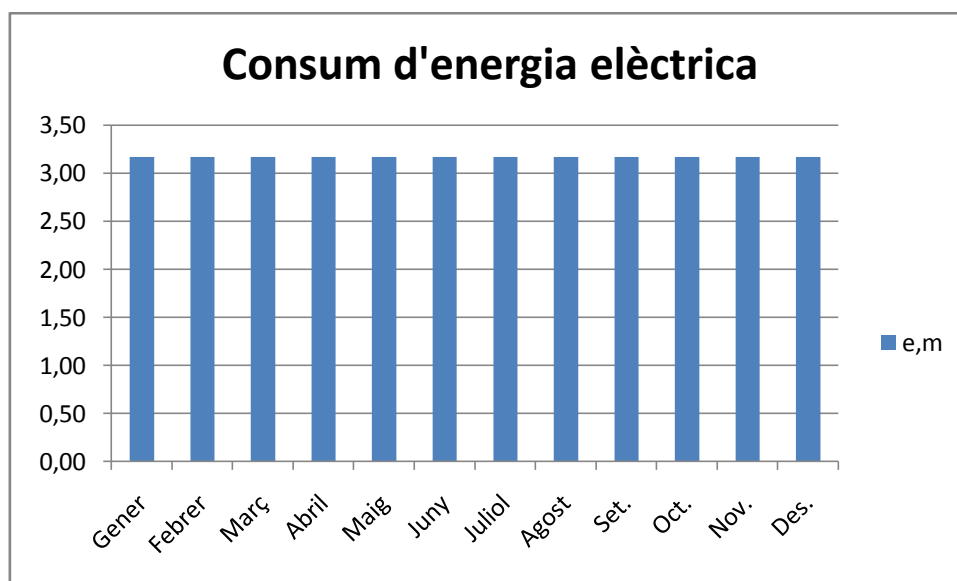


Figura 7.6: Consum d'energia elèctrica

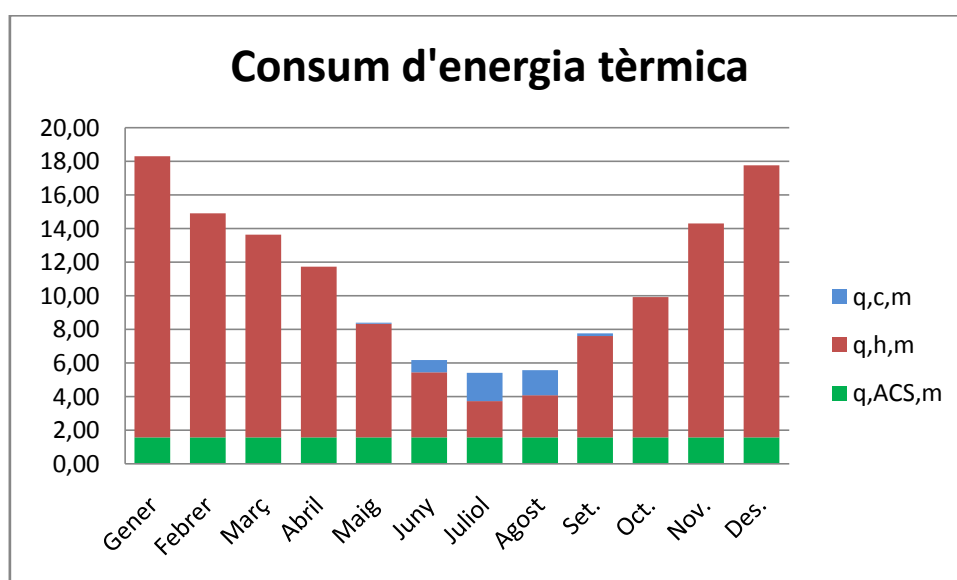


Figura 7.7: Consum d'energia tèrmica

Mes	Calor (kWh/m <sup>2</sup> )	Fred (kWh/m <sup>2</sup> )	ACS (kWh/m <sup>2</sup> )	Electricitat (kWh/m <sup>2</sup> )	Agregació del consum	
					e <sub>sys</sub> (kWh/m <sup>2</sup> )	q <sub>sys</sub> (kWh/m <sup>2</sup> )
Gener	16,72	0,00	1,58	3,17	3,17	18,30
Febrer	13,30	0,00	1,58	3,17	3,17	14,88
Març	12,04	0,00	1,58	3,17	3,17	13,61
Abril	10,15	0,00	1,58	3,17	3,17	11,73
Maig	6,77	0,07	1,58	3,17	3,17	8,45
Juny	3,87	0,72	1,58	3,17	3,17	6,64
Juliol	2,15	1,69	1,58	3,17	3,17	6,55
Agost	2,50	1,50	1,58	3,17	3,17	6,58
Setembre	6,02	0,16	1,58	3,17	3,17	7,87
Octubre	8,33	0,00	1,58	3,17	3,17	9,91
Novembre	12,72	0,00	1,58	3,17	3,17	14,30
Desembre	16,17	0,00	1,58	3,17	3,17	17,75
<b>Anual</b>	<b>110,72</b>	<b>4,13</b>	<b>18,95</b>	<b>37,99</b>	<b>37,99</b>	<b>136,56</b>

Taula 7.11: Agregació del consum

## 7.6. Estimació de càrrega

La càrrega del sistema és la quantitat d'energia necessària per omplir els dipòsits d'emmagatzematge. Durant el disseny del sistema s'ha d'estimar la càrrega mensual. Els objectius de l'estimació de càrrega són dimensionar els aparells subministradors per tal que puguin suportar la càrrega estimada i avaluar els indicadors de rendiment per al model estructural.

### 7.6.1. Compartició de càrrega

Ja que la càrrega total del sistema es reparteix entre els diferents elements subministradors cal trobar la càrrega per a cadascun d'ells i es fa segons l'estructura que presenti el sistema. La compartició de càrrega entre la unitat CHP i la caldera de suport es determina a partir de les dades del consum específic d'energia mensual del sistema mCCHP equipat amb un refrigerador TCC i de les dades de producció específica d'energia tèrmica i elèctrica. Els resultats de l'energia produïda per la unitat de cogeneració i per la caldera de suport venen recollits a la taula 7.12 i s'han calculat a partir de les equacions següents:

$$e_{cg} = e_{sys} - e_{PV} \quad (\text{Eq.159})$$

$$q_{cg} = \frac{e_{cg}}{\gamma} \quad (\text{Eq.160})$$

$$q_{ad} = q_{sys} - q_{cg} - q_{ST} \quad (\text{Eq.161})$$

Mes	Càrrega de la unitat CHP		Càrrega de la caldera de suport
	$e_{cg}$ (kWh/m <sup>2</sup> )	$q_{cg}$ (kWh/m <sup>2</sup> )	$q_{ad}$ (kWh/m <sup>2</sup> )
Gener	2,85	8,54	7,57
Febrer	2,73	8,19	3,71
Març	2,44	7,31	1,32
Abril	2,40	7,20	0,00
Maig	2,23	6,70	0,00
Juny	2,11	6,32	0,00
Juliol	2,05	6,16	0,00
Agost	2,20	6,61	0,00
Setembre	2,42	7,26	0,00
Octubre	2,63	7,88	0,00
Novembre	2,83	8,48	3,50
Desembre	2,90	8,69	7,22
<b>Anual</b>	<b>29,79</b>	<b>89,39</b>	<b>23,33</b>

Taula 7.12: Compartició de càrrega

## 7.7. Avaluació i millora del rendiment del sistema

### 7.7.1. Indicadors de rendiment a nivell del sistema

Aquests indicadors permeten avaluar l'eficiència del sistema i alhora de calcular-los és necessari conèixer el consum específic de combustible que s'ha produït. Considerant que el rendiment global de la unitat CHP és del 80% i el de la caldera de suport és del 90% i a partir de l'energia obtinguda d'aquests dispositius es pot calcular l'energia del combustible:

$$q_f = \frac{e_{cg} + q_{cg}}{\eta_{global, CHP}} + \frac{q_{ad}}{\eta_{ad}} \quad (\text{Eq.162})$$

El primer indicador és l'estalvi d'energia primària (PES) i indica el percentatge de combustible consumit pel sistema CCHP en relació a la mateixa quantitat d'energia produïda per un sistema de referència. Es considera com a sistema de referència un sistema CCHP que opera amb un rendiment elèctric del 33% i un rendiment tèrmic del 80%. El PES es determina a partir de l'equació 111, les dades de demanda d'energia elèctrica i tèrmica i del consum de combustible del sistema.

L'eficiència energètica (EFF) indica la relació entre l'energia útil que produeix el sistema i l'energia primària que consumeix i es determina a partir de l'equació 112.

A partir de les dades de la taula 7.12, els rendiments coneguts i les equacions esmentades s'obtenen els resultats presentats a continuació:

Mes	Combustible $q_f$ (kWh/m <sup>2</sup> )	PES (%)	EFF (%)
Gener	20,55	36,71	93,10
Febrer	15,75	44,15	94,15
Març	11,85	55,48	95,59
Abril	10,21	57,91	91,86
Maig	9,50	52,87	69,13
Juny	8,97	49,88	56,85
Juliol	8,74	50,85	55,65
Agost	9,38	47,37	57,61
Setembre	10,30	47,00	68,36
Octubre	11,17	49,17	84,85
Novembre	15,94	41,98	93,96
Desembre	20,38	35,87	93,04
<b>Anual</b>	<b>152,78</b>	<b>46,55</b>	<b>80,45</b>

Taula 7.13: Indicadors de rendiment

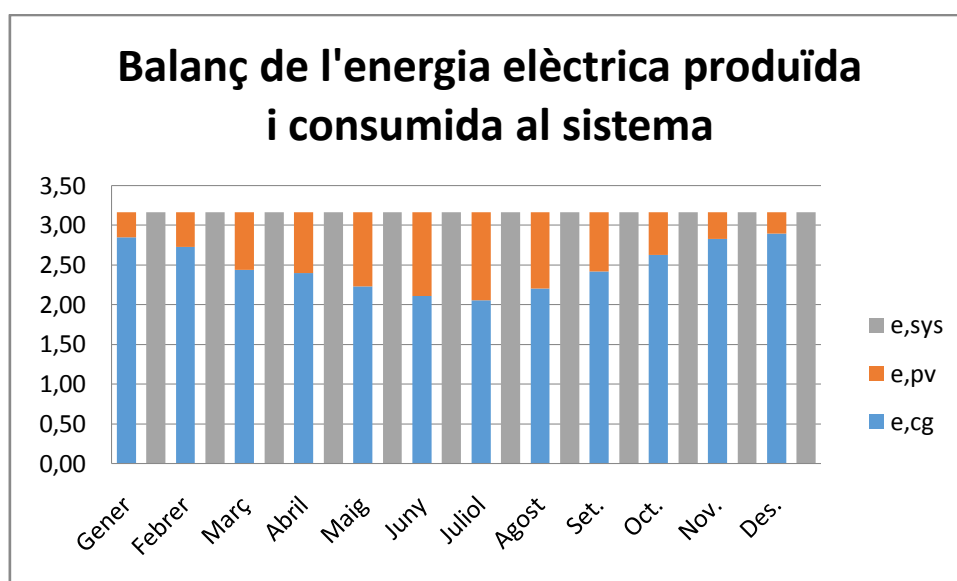
### 7.7.2. Millora del rendiment

A partir de l'anàlisi de la producció d'energia específica dels components del sistema, de reduir les pèrdues en ells i, sobretot, de la reducció de l'excés d'energia produïda es pot millorar el rendiment del sistema.

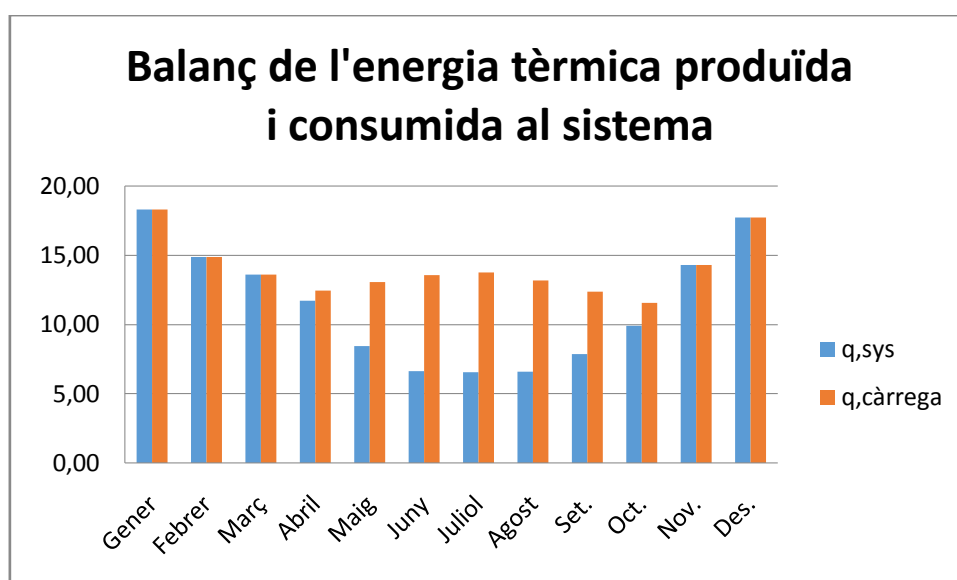
Durant l'operació del sistema, el control es basa en aconseguir el balanç entre la producció i el consum d'energia a partir de la modulació apropiada de l'energia elèctrica obtinguda de la unitat CHP per tal que conjuntament amb l'energia produïda pels panells fotovoltaics cobreixi la demanda d'energia elèctrica.

La figura 7.8 mostra el balanç de l'energia elèctrica produïda i la consumida i la figura 7.9 el de l'energia tèrmica produïda i consumida.





**Figura 7.8:** Balanç de l'energia elèctrica



**Figura 7.9:** Balanç de l'energia tèrmica

Per tal de millorar el rendiment del sistema s'eliminarà l'excés d'energia tèrmica que té lloc des de l'abril a l'octubre tal com es pot observar a la figura 7.9.

Per tal d'eliminar l'excés en la producció d'energia tèrmica cal modificar la superfície de captació dels panells solars tèrmics per adequar la seva producció a la quantitat estrictament necessària.

Primer es calcularà l'excés d'energia tèrmica mensual a partir de la següent expressió:

$$q_{excés} = q_{ST} - (q_{sys} - q_{cg} - q_{ad}) \quad (\text{Eq.163})$$

Es prendrà com a referència el mes amb un major excés en la producció d'energia tèrmica, en aquest cas, juliol amb 7,21 kWh/m<sup>2</sup>. A partir d'aquest excés es redimensionarà la superfície dels panells tèrmics. La calor útil al mes de juliol és la diferència entre la calor produïda pels panells solars tèrmics i l'energia que s'ha produït en excés: 0,39 kWh/m<sup>2</sup>

La relació entre la calor útil produïda pels panells al mes de juliol i la calor total que produeixen per al mateix mes indica la reducció que cal aplicar en l'energia que generen. S'obté que la nova superfície de captació haurà de ser un 5% de la superfície actual.

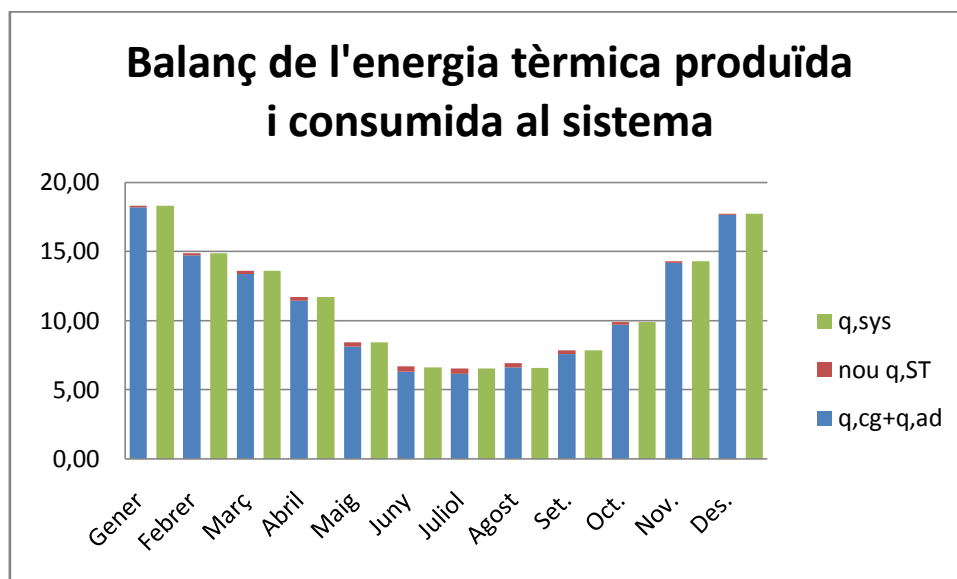
A partir del producte entre aquest coeficient i la superfície ocupada originalment pels panells s'obté un resultat per a l'àrea corregida de 0,9 m<sup>2</sup>.

Un cop coneguda la nova superfície es calculen les noves produccions mensuals d'energia tèrmica específica per part dels panells solars tèrmics i de la caldera de suport i la nova energia primària específica del combustible utilitzat.

Mes	Càrrega dels panells PV i ST		Caldera de suport q <sub>ad</sub> (kWh/m <sup>2</sup> )	Combustible q <sub>f</sub> (kWh/m <sup>2</sup> )	PES (%)	EFF (%)
	e <sub>PV</sub> (kWh/m <sup>2</sup> )	q <sub>ST</sub> (kWh/m <sup>2</sup> )				
Gener	0,32	0,11	9,65	22,86	29,58	92,15
Febrer	0,44	0,15	6,54	18,90	32,96	92,59
Març	0,73	0,25	6,05	17,11	35,70	92,74
Abril	0,77	0,27	4,26	14,96	38,31	93,12
Maig	0,93	0,32	1,43	11,10	44,96	94,06
Juny	1,06	0,37	0,00	8,97	49,88	94,36
Juliol	1,11	0,39	0,00	8,74	50,85	94,88
Agost	0,96	0,33	0,00	9,38	47,37	91,29
Setembre	0,75	0,26	0,35	10,69	44,99	94,37
Octubre	0,54	0,19	1,84	13,22	39,82	93,69
Novembre	0,34	0,12	5,70	18,38	33,08	92,71
Desembre	0,27	0,09	8,96	22,31	29,78	92,22
Anual	8,20	2,84	44,34	176,18	38,36	93,23

**Taula 7.14:** Paràmetres posteriors a la millora de l'eficiència

El nou balanç entre l'energia tèrmica produïda i la consumida es mostra a la figura 7.10:



**Figura 7.10:** Balanç de l'energia tèrmica

A partir de l'anàlisi dels nous indicadors de rendiment es pot veure que tot i que és cert que l'eficiència ha millorat, ja que ha augmentat en un 12,78%, el PES ha disminuït en un 8,19% i per tant el sistema té un consum de combustible més elevat que es traduirà en un cost major.

Posteriorment, es calcularan més indicadors a partir dels paràmetres calculats que, juntament amb el PES i la EFF ajudaran a prendre una decisió sobre l'elecció entre el sistema previ a la millora d'eficiència o el sistema posterior.

### 7.7.3. Avaluació del rendiment total i la relació d'energies renovables

Pel que fa a l'energia consumida per l'habitatge, també es poden calcular el rendiment total de l'edifici ( $E_{p,tot}$ ) que indica la demanda d'energia primària i la relació d'energies renovables (RER) que indica quin percentatge de l'energia utilitzada a la casa té un origen renovable.

Aquests indicadors es calculen a partir de les equacions 113-115 i s'ha fet per als dos casos; previ i posterior a la millora de l'eficiència:

Portadors d'energia	Energia (kWh/m <sup>2</sup> any)	Energia entregada (kWh/m <sup>2</sup> any)	fp. ren	Ep. ren (kWh/m <sup>2</sup> any)	fp. nren	Ep. nren (kWh/m <sup>2</sup> any)	Fp. total	Ep. total (kWh/m <sup>2</sup> any)
Elèctrics	37,99							
Panells PV		8,20	1,00	8,20	0,00	0,00	1,00	8,20
Unitat CHP		29,79	0,00	0,00	1,10	32,77	1,10	32,77
Tèrmics	136,56							
Panells ST		56,00	1,00	56,00	0,00	0,00	1,00	56,00
Unitat CHP		89,39	0,00	0,00	1,10	98,32	1,10	98,32
Caldera de suport		23,33	0,00	0,00	1,10	25,66	1,10	25,66
Indicador de rendiment energètic de l'edifici			Ep. ren	64,20	Ep. nren	156,76	Ep. Total	<b>220,96</b>
Relació d'energies renovables, RER (%)								<b>29,05</b>

Taula 7.15: Ep i RER previs a la millora de l'eficiència

Portadors d'energia	Energia (kWh/m <sup>2</sup> any)	Energia entregada (kWh/m <sup>2</sup> any)	fp. Ren	Ep. ren (kWh/m <sup>2</sup> any)	fp. nren	Ep. nren (kWh/m <sup>2</sup> any)	Fp. total	Ep. total (kWh/m <sup>2</sup> any)
Elèctrics	37,99							
Panells PV		8,20	1,00	8,20	0,00	0,00	1,00	8,20
Unitat CHP		29,79	0,00	0,00	1,10	32,77	1,10	32,77
Tèrmics	136,56							
Panells ST		<u>2,84</u>	1,00	2,84	0,00	0,00	1,00	11,97
Unitat CHP		89,39	0,00	0,00	1,10	98,32	1,10	98,32
Caldera de suport		<u>44,34</u>	0,00	0,00	1,10	48,77	1,10	48,77
Indicador de rendiment energètic de l'edifici			Ep. ren	11,04	Ep. nren	179,87	Ep. Total	<b>190,90</b>
Relació d'energies renovables, RER (%)								<b>5,78</b>

Taula 7.16: Ep i RER posteriors a la millora de l'eficiència

Els factors d'energia primària utilitzats venen donats per la següent taula:

Subministrador d'energia	Factor d'energia primària		
	Renovable	No renovable	Total
Xarxa elèctrica	0,2	2,3	2,5
Panell solar tèrmic	1	0	1
Panell fotovoltaic	1	0	1
Gas natural	0	1,1	1,1

**Taula 7.17:** Factors d'energia primària [4]

Al comparar els dos casos s'observa que tant l'indicador del rendiment energètic de l'edifici com la relació d'energies renovables són significativament superiors en el cas previ a la millora de l'eficiència. A la vista d'aquests resultats i dels indicadors calculats al punt 7.7.2. s'ha decidit que s'implantarà el sistema previ a la millora d'eficiència ja que consumeix menys combustible, té un indicador del rendiment energètic de l'edifici més elevat, dona més importància a les energies renovables i tindrà un cost d'operació més baix.

## 7.8. Dimensionament dels components del sistema

Per dimensionar els elements del sistema cal determinar els valors nominals per a les característiques requerides de cada component, l'elecció dels productes que satisfan aquestes característiques i l'avaluació del temps d'operació i el temps d'ús diaris de cadascun. Per a aquest dimensionament cal tenir en compte les característiques tècniques dels elements disponibles al mercat i les quantitats d'energia mensual en referència al consum o a la càrrega.

### 7.8.1. Components del subsistema elèctric

#### PANELS FOTOVOLTAICS

Els paràmetres inicials a tenir en compte alhora d'escollir aquests panells són la producció fotovoltaica específica per al mes de major producció fotovoltaica (juliol) i el temps mitjà d'exposició a la llum solar a la potencia nominal per a aquest mateix mes.

A partir de les dades del sistema i les equacions 116-118 i considerant un factor de reducció  $k=0,8$  per als dies ennuvolats, s'obtenen els següents resultats:

Radiació solar horitzontal al juliol ( $\text{Wh/m}^2/\text{d}$ )	Temps de llum solar (h)	Producció PV específica, $e_{PV}$ ( $\text{kWh/m}^2_{TFA}$ )	Energia produïda al mes de juliol (kWh)	Energia diària produïda al mes de juliol	Potència dels panells PV (kW)
6.810	6,81	1,11	311,60	12,56	1,85

**Taula 7.18:** Taula de resultats

S'ha escollit un model Jinko JKM190m-72 [16] amb les següents característiques:

- Potència nominal,  $P_{SMn}=190W$
- Voltatge nominal,  $V_{SMn}=36,6V$
- Corrent d'operació,  $I_{np}=5,19A$

El nombre de mòduls instal·lats, el nombre de mòduls connectats en sèrie i el nombre de files de mòduls connectades en paral·lel es determinen a partir de les equacions 119-121:

Nombre de mòduls instal·lats, $n_{SM}$	10
Nombre de mòduls en sèrie, $n_{SMs}$	2
Nombre de files en paral·lel, $n_{SM,p}$	5

**Taula 7.19:** Taula de resultats

### CAPACITAT DE LES BATERIES

A partir de l'equació 122 i per a un període de temps d'un dia, la quantitat d'energia calculada que cal emmagatzemar en les condicions més desfavorables,  $E_{need}$  resulta 31,66 kWh.

El voltatge imposat a les bateries,  $V_{bateries}$  és igual a  $V_{CC}=48V$  i les bateries escollides [17] tenen les següents característiques:  $V_{bateria}=12V$  i  $C_{bateria}=250Ah$ . L'equació 123 permet calcular el nombre de bateries que cal connectar en sèrie per satisfer les necessitats del sistema en quant a l'emmagatzematge d'energia elèctrica;  $n_1=4$ .

Les equacions 124 i 125 permeten calcular la capacitat del sistema de bateries. Considerant acceptable un nivell de descàrrega,  $ND=0,7$  i un coeficient de reducció de la capacitat,  $RT=1$ , s'obté una capacitat del sistema de bateries,  $C_{bateries}=659,58Ah$  i una capacitat nominal,  $C_{20}=942,26Ah$ .

El nombre de files de bateries i el nombre de bateries necessaris es determinen a partir de les equacions 126 i 127. Els resultats obtinguts són de 4 files de bateries i 16 bateries en total. Amb aquesta disposició, la capacitat total de cada fila de bateries és de 1.000Ah.

### CONTROLADOR DE CÀRREGA SOLAR

Aquest controlador regula el voltatge de les bateries, el corrent de sortida segons la potència disponible als panells fotovoltaics i l'estat de càrrega de les bateries de manera que carrega les bateries de manera òptima.

La selecció del controlador de càrrega solar passa per escollir el voltatge d'entrada ( $V>48V$ ), una entrada de potència superior a la potència màxima dels panells PV al seu voltatge màxim, i un corrent de càrrega de les bateries màxim,  $I=65A$ .

El model de controlador escollit és l'MPPT 60 150 de la marca Schneider [18].

## UNITAT DE COGENERACIÓ

La potència de la unitat de cogeneració s'obté a partir de l'equació 128 i el valor prèviament calculat de l'energia específica al mes amb una major càrrega per a la unitat. El valor de la potència elèctrica a subministrar obtingut és de  $P_{\text{CHP}}=5,24W_e$  a partir d'un temps diari d'operació estimat de 5h. Sabent que la potència nominal de la unitat CHP ha de ser superior al valor calculat s'ha escollit el model Cleanergy C9G [19][20] amb les característiques següents:

- Motor de tipus cinemàtic
- Fluid de treball: heli
- Velocitat a l'eix: 1.500 rpm
- Potència elèctrica: 2-9 kW<sub>e</sub>
- Potència tèrmica: 8-24 kW<sub>th</sub>
- Rendiment elèctric: 24%
- Rendiment tèrmic: 90%
- Combustible: gas natural

## INVERSORS

El dimensionament dels inversors ha d'atendre als següents criteris:

- La seva capacitat de sortida nominal ( $P_{\text{sortida}}$ ) ha de ser un terç de la potència de la unitat de cogeneració, per tant:  $P_{\text{sortida}} = 3 \text{ kW}$
  - El voltatge d'entrada ha de ser igual al voltatge nominal de les bateries, per tant,  $V_{\text{entrada}} = V_{\text{CC}} = 48\text{V}$ .
  - El voltatge nominal de sortida ha de ser  $V_{\text{sortida}} = 220 \sim 230 \text{ V}_{\text{AC}}$ ,  $50 \pm 0,05 \text{ Hz}$ ,  $\text{THD} < 4\%$
- El model d'inversor escollit ha estat el 4000-48 XTM de la sèrie Xtender d'Studer Innotec [21] que té les següents característiques tècniques:

Voltatge de sortida	Voltatge de les bateries	Corrent de càrrega	Corrent màxim	Potència
230 V <sub>AC</sub> /50Hz	48 V <sub>DC</sub>	50 A <sub>DC</sub>	50 A <sub>DC</sub>	4,000 VA

Taula 7.20: Dades del model escollit

### 7.8.2. Components del subsistema tèrmic

#### PANELS SOLARS TÈRMICS

Coneguts els valors de la producció solar tèrmica per al mes de major producció (juliol), el temps mitjà d'hores de Sol per a aquest mes i les dades de producció solar tèrmica, a partir de les equacions 129-132 s'obtenen els següents valors per als panells solars tèrmics recollits a la taula 7.21. S'ha considerat un factor de reducció  $k=0,8$  per als dies ennuvolats.

Radiació solar horitzontal al juliol ( $\text{Wh/m}^2/\text{d}$ )	Temps de llum solar (h)	Producció ST específica, $q_{ST}$ ( $\text{kWh/m}^2_{TFA}$ )	Energia produïda al mes de juliol (kWh)	Energia diària produïda al mes de juliol	Àrea d'absorció dels panells ST ( $\text{m}^2$ )
6.810	6,81	7,60	2.127,99	85,81	12,60

Taula 7.21: Taula de resultats

El model de col·lector solar escollit és l'ECOSOL – 3.0 TINOX PLUS [22] que consta d'una àrea d'absorció de  $2,67 \text{ m}^2$  i una eficiència òptica de 82,3%. A partir de l'equació 133 s'obté que el nombre de col·lectors necessaris per a la instal·lació és de 5,73, per tant, se'n col·locaran 6.

### CALDERA DE SUPORT

Conegut el valor de l'energia específica al mes amb una major càrrega per a la caldera de suport, a partir de les equacions 135-137 i considerant un temps d'operació de 4 hores, s'obté que la potència de la caldera de suport ha de ser de 21,01 kW:

Energia produïda al mes de major càrrega (kWh/mes)	Energia produïda un dia del mes (kWh/dia)	Potència tèrmica de la caldera (kW)
2.120,41	68,40	17,10

Taula 7.22: Taula de resultats

El model de caldera escollit és el BioLyt 50 de Hoval [23] amb un rang de potències de sortida de 14 a 49 kWt i un sistema d'alimentació a base de pelets automatitzat.

### REFRIGERADOR

La quantitat de calor necessària per fer funcionar el refrigerador equival a la diferència entre el consum total al mes amb major consum de calor i la calor utilitzada per a l'escalfament d'ACS:

$$Q_c = Q_{\text{sys}} - Q_{\text{ACS}}$$

Per dimensionar el refrigerador s'han fet servir les equacions 138-140 i la calor específicanecessari per a refrigeració al mes de juliol. També s'ha considerat un factor de reducció  $k=0,8$  per als dies ennuvolats i un temps d'operació de 10 hores. Els resultats obtinguts venen recollits a la taula 7.23:

Calor específicanecessari d'entrada al refrigerador ( $\text{kWh/m}^2 \text{ mes}$ )	Quantitat de fred produïda al mes de major càrrega (kWh/mes)	Quantitat de fred produïda un dia del mes (kWh/dia)	Potència del refrigerador (kW)
2,82	789,32	31,83	3,18

Taula 7.23: Taula de resultats



S'ha escollit un refrigerador Solabcool [24] amb una capacitat de 3 a 5 kW i un cop de 0,6

Per a l'emmagatzematge de fred s'ha escollit un tanc de 500 l [25].

## DIPÒSIT DE CALOR

Per tal de dimensionar el tanc cal conèixer el consum màxim de calor per al mes on pren un valor més elevat (gener) i la demanda màxima de fred per al mes on és major (juliol). També s'ha estimat que la temperatura de l'aigua del tanc convergirà entre 10 i 90 °C.

A partir de les equacions 142-145 s'obtenen els següents resultats:

<b>Demanda d'energia al mes de gener (kWh/mes)</b>	<b>Calor produïda un dia del mes de gener (kWh/dia)</b>	<b>Volum del tanc (l)</b>
5.123,51	165,27	1.786,76

**Taula 7.24:** Taula de resultats

A la vista del valor obtingut s'ha escollit un tanc d'acumulació Cerbos de 1.900 l [26]

## CIRCUITS HIDRÀULICS

Dimensionar un circuit hidràulic consisteix en ubicar els elements que continguin bombes o vàlvules, elements de protecció o de connexió i connectar-los. La casa ja té un sistema hidràulic previ a la implantació del sistema mCCHP que es podrà aprofitar en gran part. Tot i així, cal ampliar-lo per tal de connectar els nous components i fer un circuit de la caldera de suport al tanc d'aigua calenta, un del tanc de calor al refrigerador, un de descàrrega de calor al refrigerador, un de connexió de la unitat CHP i dos per connectar els panells fotovoltaics i solars tèrmics.

Degut a la possibilitat de reaprofitar elements ja instal·lats a l'habitatge i que per la connexió de nous elements cal tenir en compte la morfologia de la casa i els requeriments que sorgeixin durant la instal·lació no s'han tingut en compte les modificacions en el sistema hidràulic.

## 7.9. Correcció del sistema a partir del consum dels aparells

És impossible conèixer amb exactitud les condicions de càrrega amb les que treballarà el sistema, per tant, aquestes s'han determinat a partir d'aproximacions i dades estadístiques. Els aparells escollits al punt 7.8 també tenen un consum propi que haurà d'assumir el sistema i, per tal d'aproximar amb més exactitud les condicions reals d'operació, és convenient afegir una altra iteració al procés de disseny on s'incloguin aquests consums. Aquesta iteració comportarà la modificació de molts dels paràmetres d'operació del sistema, però la majoria dels elements escollits són capaços d'operar dins d'uns certs marges i, aquests sobre dimensionaments haurien de ser suficients per poder suportar el consum extra.

El consum propi dels aparells s'ha estimat a la taula següent:

	Consum propi (kW)	Temps d'operació diari (h)	Energia (kWh anuals)
Subsistema elèctric del motor Stirling	0,09	5	164,25
Bomba de refrigeració del motor Stirling	0,071	5	129,575
Ventilador del motor Stirling	0,34	5	620,5
Subsistema elèctric de la caldera de suport	0,09	4	131,4
Bombes de la caldera de suport	0,382	4	557,72
Bombes del circuit d'aigua calenta	0,802	2,5	731,825
Subsistemes i bombes del refrigerador	2,218	1	809,57
<b>TOTAL</b>			<b>3144,84</b>

**Taula 7.25:** Consum propi dels equips del sistema

La incorporació del consum dels aparells provoca un increment en l'energia elèctrica que consumeix el sistema de manera que és necessari calcular els paràmetres del sistema que d'ella en depenen. Els càlculs necessaris són els mateixos que s'han explicat en els punts anteriors però partint del nou consum d'electricitat,  $e = 42,08 \text{ kWh/m}^2 \text{ any}$ , que resulta de sumar el valor obtingut al consum prèviament calculat al punt 7.5.4. Els paràmetres del sistema que han canviat a arrel de la incorporació dels consums propis dels aparells venen recollits a les taules següents:

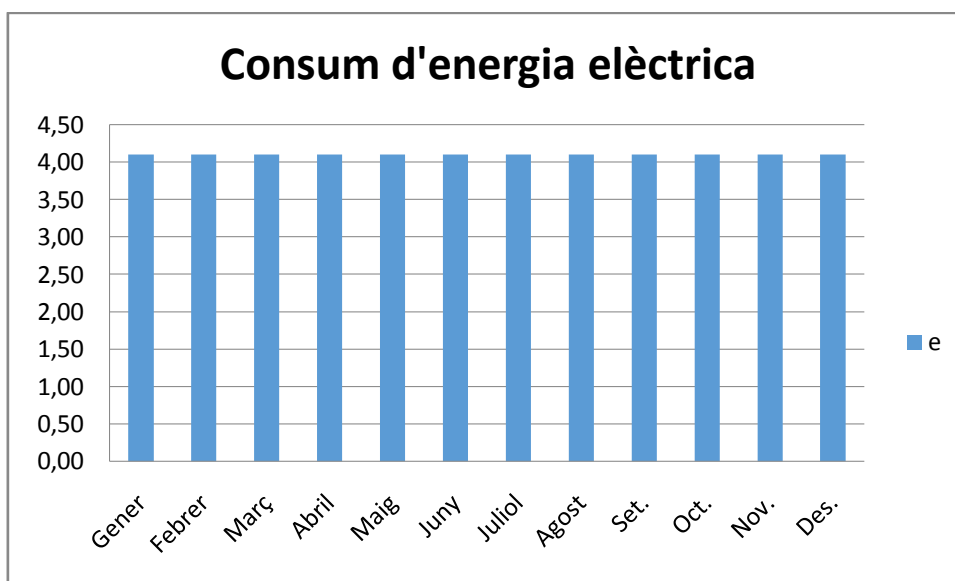
Mes	Càrrega del sistema		Càrrega de la unitat CHP		Càrrega de la caldera de suport
	$e_{sys}$ (kWh/m <sup>2</sup> )	$q_{sys}$ (kWh/m <sup>2</sup> )	$e_{cg}$ (kWh/m <sup>2</sup> )	$q_{cg}$ (kWh/m <sup>2</sup> )	$q_{ad}$ (kWh/m <sup>2</sup> )
Gener	4,10	18,30	3,78	11,35	4,76
Febrer	4,10	14,88	3,67	11,00	0,90
Març	4,10	13,61	3,37	10,12	0,00
Abril	4,10	11,73	3,33	10,01	0,00
Maig	4,10	8,45	3,17	9,51	0,00
Juny	4,10	6,64	3,04	9,13	0,00
Juliol	4,10	6,55	2,99	8,97	0,00
Agost	4,10	6,58	3,14	9,42	0,00
Setembre	4,10	7,87	3,36	10,07	0,00
Octubre	4,10	9,91	3,56	10,68	0,00
Novembre	4,10	14,30	3,76	11,29	0,69
Desembre	4,10	17,75	3,83	11,50	4,41
<b>Anual</b>	<b>49,22</b>	<b>136,56</b>	<b>41,02</b>	<b>123,08</b>	<b>10,77</b>

Taula 7.26: Nous paràmetres del sistema

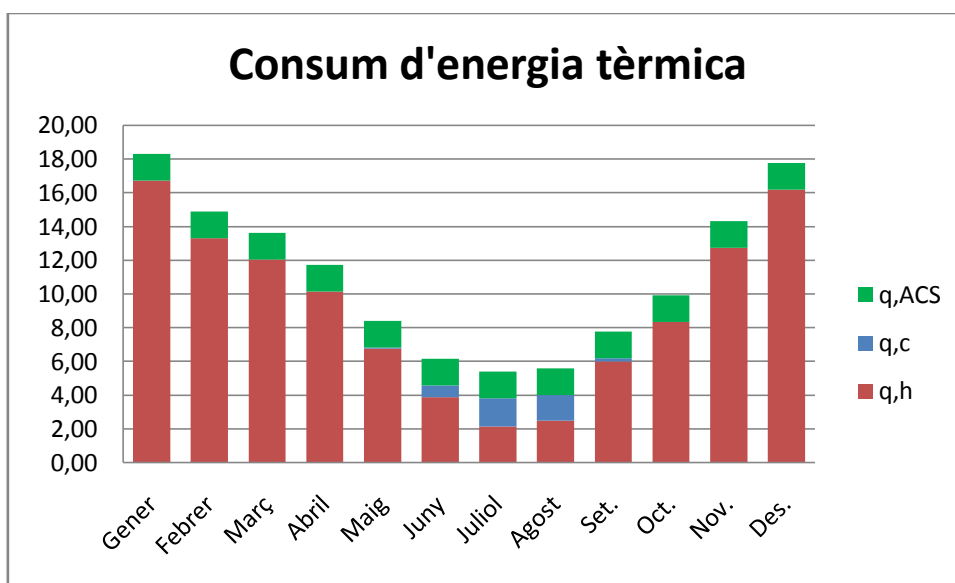
Mes	Combustible	PES (%)	EFF (%)
	$q_f$ (kWh/m <sup>2</sup> )		
Gener	24,20	31,44	83,86
Febrer	19,33	37,71	83,45
Març	16,87	42,72	78,48
Abril	16,68	38,44	69,79
Maig	15,85	31,10	54,23
Juny	15,22	26,59	45,71
Juliol	14,95	27,48	45,00
Agost	15,70	23,99	45,97
Setembre	16,78	24,64	52,91
Octubre	17,81	28,24	63,55
Novembre	19,59	35,35	82,73
Desembre	24,07	30,45	83,48
<b>Anual</b>	<b>217,11</b>	<b>32,12</b>	<b>66,04</b>

Taula 7.27: Nous indicadors del sistema

Els nous consums d'energia elèctrica i d'energia tèrmica es representen de la següent manera:

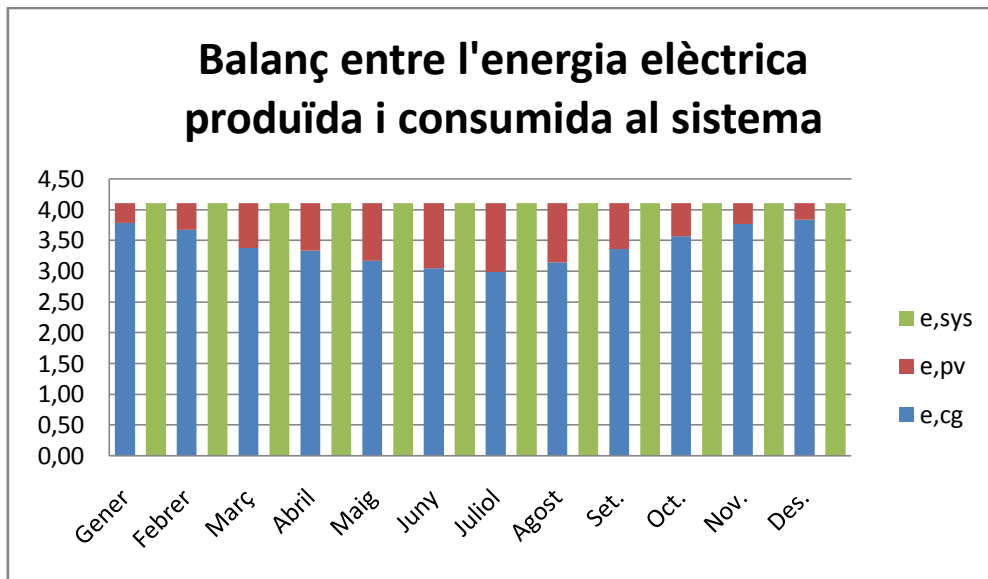


**Figura 7.11:** Consum d'energia elèctrica

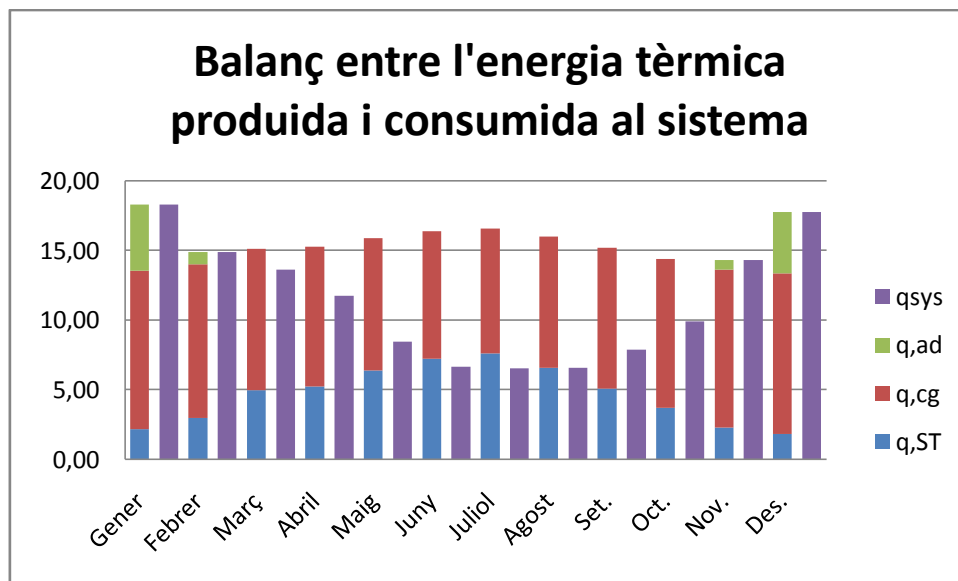


**Figura 7.12:** Consum d'energia tèrmica

Els nous balanços entre l'energia produïda i consumida al sistema es representen de la següent manera:



**Figura 7.13:** Balanç de l'energia elèctrica



**Figura 7.14:** Balanç de l'energia tèrmica

Els nous resultats també fan necessari tornar a calcular l'indicador del rendiment energètic de l'edifici així com la relació d'energies renovables.

Portadors d'energia	Energia (kWh/m <sup>2</sup> any)	Energia entregada (kWh/m <sup>2</sup> any)	fp. ren	Ep. ren (kWh/m <sup>2</sup> any)	fp. nren	Ep. nren (kWh/m <sup>2</sup> any)	Fp. Total	Ep. total (kWh/m <sup>2</sup> any)
Elèctrics	49,22							
Panells PV		8,20	1,00	8,20	0,00	0,00	1,00	8,20
Unitat CHP		41,02	0,00	0,00	1,10	45,13	1,10	45,13
Tèrmics	136,56							
Panells ST		56,00	1,00	56,00	0,00	0,00	1,00	56,00
Unitat CHP		123,08	0,00	0,00	1,10	135,39	1,10	135,39
Caldera de suport		10,77	0,00	0,00	1,10	11,85	1,10	11,85
Indicador de rendiment energètic de l'edifici			Ep. ren	64,20	Ep. nren	192,37	Ep. Total	<b>256,57</b>
Relació d'energies renovables, RER (%)								<b>25,02</b>

**Taula 7.27: Ep i RER**

A partir del mateix procediment fet servir anteriorment s'ha obtingut un indicador  $E_p$  de 256,57 i una RER de 25,02%.

Pel que fa als elements del subsistema elèctric, ha estat necessari redimensionar les bateries a partir del mateix procediment que s'ha fet servir anteriorment degut a la nova càrrega:

La nova energia que cal emmagatzemar en les condicions mes desfavorables,  $E_{need}$  és de 41,02 kWh.

Es fa servir el mateix model de bateria que s'havia previst inicialment i els nous càlculs determinen que el nombre de bateries que cal connectar en sèrie per satisfer les necessitats del sistema en quant a l'emmagatzematge d'energia elèctrica és  $n_1=4$ .

També s'obté una capacitat del sistema de bateries,  $C_{batteries}=854,58Ah$  i una capacitat nominal,  $C_{20}=1220,82Ah$ .

El nombre de files de bateries necessari al sistema és ara de 6, per tant, el sistema disposarà de 24 bateries en total. Amb aquesta disposició, la capacitat total de cada fila de bateries és de 1.500Ah.

La potència de sortida necessària per part de la unitat de cogeneració també serà diferent. A partir del mateix procediment que s'ha seguit anteriorment, s'obté una potència,  $P_{CHP}$  de 6,93 kW, però com aquesta potència segueix estant dins del rang que ofereix el model seleccionat no cal canviar l'elecció.

De la mateixa manera que les noves condicions afecten a la potència de sortida de la unitat de cogeneració, també ho fan amb la de la caldera de suport. Repetint novament el procediment, s'obté que la producció de la caldera al mes de major càrrega haurà de ser de 1.334,12 kWh i, per tant, en un dia d'aquest mateix mes haurà de produir 43,04 kWh. A partir d'aquests resultats, la nova potència de la caldera de suport és de 11,99 kW i es pot canviar a una potència inferior. S'ha escollit el model Domusa Bioclass NG [32] amb una potència nominal de 20 kW i un rendiment del 89,75%.

## 7.10. Operació i control del sistema

Aquest sistema opera en mode autònom, és a dir, aïllat de la xarxa i amb el motor Stirling en mode de funcionament impulsat per electricitat.

En l'estratègia de control que es segueix, es fan servir dos valors dels acumuladors (voltatge de les bateries i temperatura del tanc d'acumulació) com a indicadors del desequilibri entre la potència produïda i la potència consumida ja que tots dos decreixen si quan es consumeix més potència de la que es produeix i creixen en el cas contrari. Per tant, el sistema regula la potència produïda per tal de mantenir el voltatge i la temperatura esmentats en els seus valor nominals.

El sistema es munta de manera que el motor Stirling està impulsat pel llaç de control del voltatge de la bateria i la caldera de suport pel llaç de control de la temperatura del tanc.

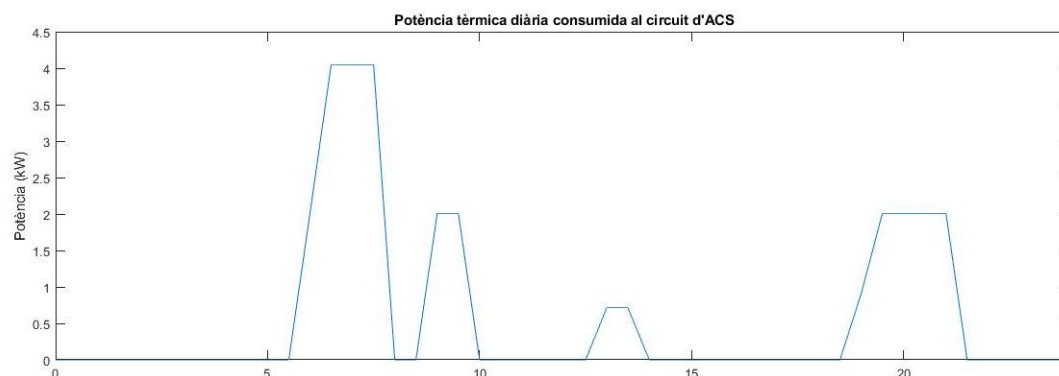
El control del sistema es duu a terme a través d'un controlador continu PI amb control PWM ja que garanteix una variació lleugera de les variables del sistema.

## 7.11. Anàlisi del sistema

Val la pena efectuar un anàlisi del comportament que tindrà el sistema durant la seva posada en marxa. Les condicions d'operació del sistema tenen uns requeriments concrets.

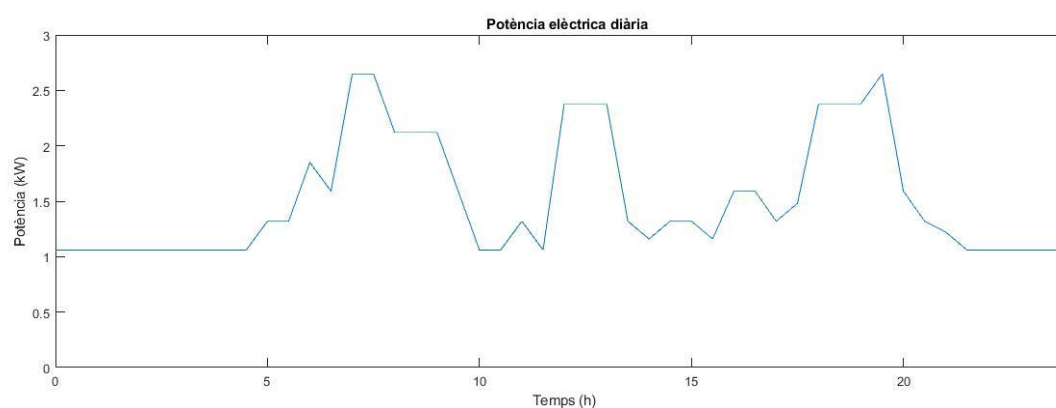
La demanda d'ACS per part dels habitants serà mes o menys constant diàriament i independentment del mes de l'any seguint el comportament que es pot observar a la figura següent amb els pics de consum situats a les mateixes hores del dia:





**Figura 7.15:** Potència tèrmica consumida per ACS

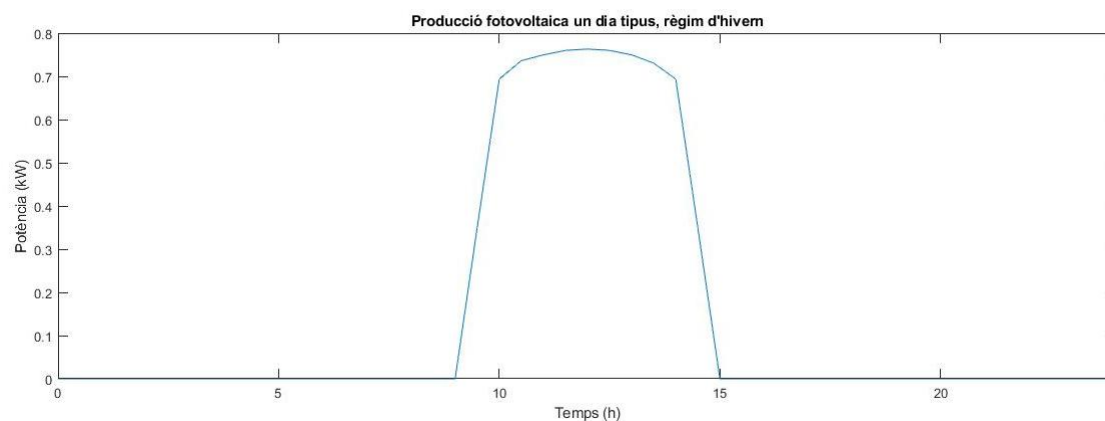
De la mateixa manera, el consum d'energia elèctrica també es pot estimar més o menys constant durant tot l'any. El comportament de la demanda diària ve descrit per la figura següent:



**Figura 7.16:** Potència elèctrica consumida

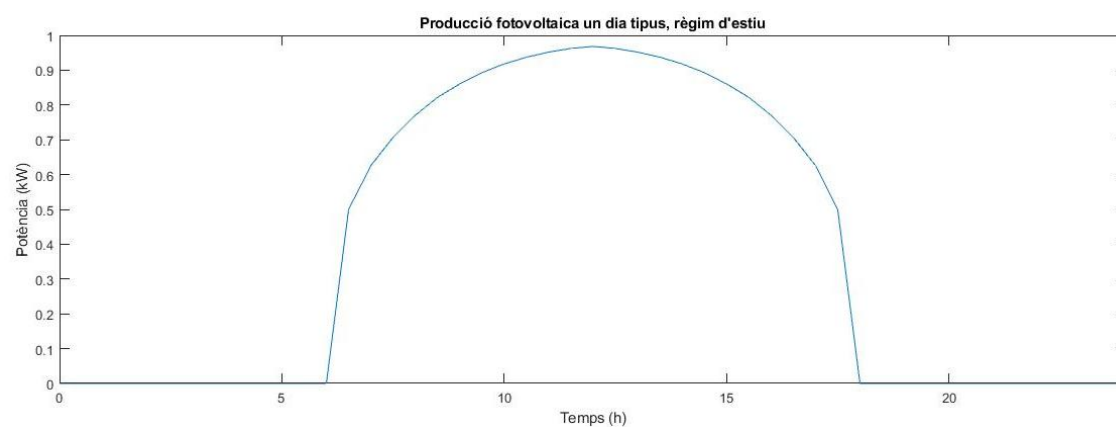
La potència entregada pels panells fotovoltaics i els panells tèrmics, en canvi, varia dràsticament segons el mes de l'any ja que depèn directament de la irradiància solar rebuda. Per tal d'estimar el seu comportament s'ha simulat gràficament la potència diària que subministraran per a un dia tipus de desembre (mes de menor producció) i per a un dia tipus de juliol (mes de major producció).

Producció fotovoltaica un dia tipus de desembre:



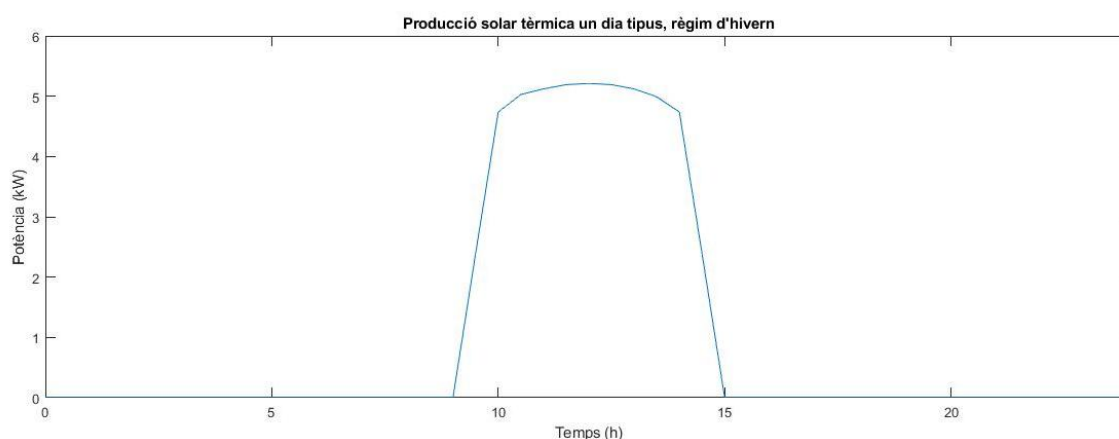
**Figura 7.17:** Producció fotovoltaica (hivern)

Producció fotovoltaica un dia tipus de juliol:



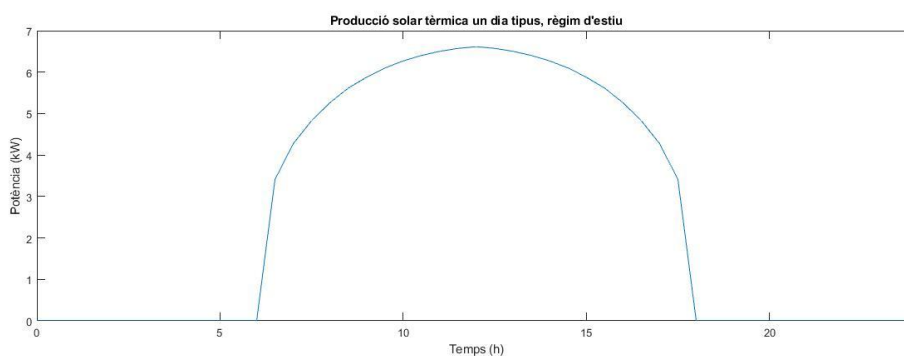
**Figura 7.18:** Producció fotovoltaica (estiu)

Producció solar tèrmica un dia tipus de desembre:



**Figura 7.19:** Producció solar tèrmica (hivern)

Producció solar tèrmica un dia tipus de juliol:



**Figura 7.20:** Producció solar tèrmica (estiu)

## 7.12. Conclusions

El sistema dissenyat és capaç de subministrar electricitat i calor a la casa per tal de cobrir les seves necessitats energètiques durant tots els mesos de l'any i de manera independent de la xarxa elèctrica. A més a més, ho fa de manera eficient i fent ús parcial d'energies renovables. El mètode proposat per tal d'incrementar l'eficiència ha resultat efectiu però s'ha desestimat ja que tot i que a través de la seva implementació s'utilitzava més l'energia primària produïda, feia perdre protagonisme a les energies renovables en el sistema i augmentar el consum de combustible. Al dissenyar el sistema, no es pot incloure el consum d'energia elèctrica que tindrà el propi sistema ja que depèn dels equips utilitzats que s'escullen un cop dissenyat però s'han tingut en compte a través d'una nova iteració en el procés de disseny. Al incloure els consums i, com era d'esperar,

l'eficiència del sistema ha disminuït però és necessari que el sistema s'ajusti el màxim possible a les seves condicions d'operació reals.

## 8. Impacte ambiental

Ja que la millora de l'eficiència energètica així com la reducció en l'emissió de gasos d'efecte hivernacle són factors totalment integrats en la naturalesa d'aquest projecte, és convenient comentar l'impacte ambiental derivat de la implantació del sistema.

Si bé és cert que durant la construcció dels elements del sistema s'emeten gasos nocius per al medi ambient, tant bon punt el sistema comenci a operar se'n derivaran una sèrie de beneficis de caràcter positiu. El sistema produeix energia fotovoltaica i solar tèrmica i, ja que les necessitats energètiques de l'habitatge seguiran sent les mateixes que abans de la seva implantació, una part d'elles seran ara cobertes per energia neta. D'aquesta manera es redueixen les emissions de gasos GHG al medi ambient respecte a l'escenari previ que feia servir energia de la xarxa de distribució tot i que no s'eliminen ja que el sistema està dotat d'un motor Stirling alimentat per gas natural. La alta eficiència dels processos de cogeneració és també molt beneficiosa pel medi ja que permet satisfer la demanda energètica reduint significativament l'energia primària utilitzada i estalviant així recursos en comparació amb altres formes de generació. També cal senyalar que al generar electricitat de manera descentralitzada s'estalviarà també energia ja que això evita les pèrdues en el seu transport i qualsevol millora en l'eficiència energètica es tradueix en un benefici mediambiental.

L'operació del sistema produirà inevitablement una contaminació acústica que afectarà als habitants de la casa. Si bé és cert que no es pot eliminar completament aquest efecte no desitjat, l'elecció d'una tecnologia per a la unitat CHP basada en un motor Stirling comporta un impacte acústic inferior a altres tecnologies. El model d'unitat CHP escollit emet menys de 67 dB segons les característiques proporcionades pel fabricant.

## Estudi econòmic

### Costos d'operació previs a la implantació del sistema

Aquests costos vindran donats per la suma dels costos de l'energia elèctrica consumida de la xarxa i els del gas consumit per cobrir la demanda d'energia tèrmica.

El cost de la factura elèctrica ve donat per la potència instal·lada i la quantitat d'energia consumida. Els preus s'han estimat a través de les dades de factures recents de la comercialitzadora ENDESA. La casa té una potència instal·lada de 10 kW i el kW instal·lat té un preu anual de 38,04€, el que fa un total de 380,40€. La quantitat d'energia que consumeix la casa anualment calculada anteriorment és  $e_{sys}=37,99 \text{ kWh/m}^2$  anuals, que per als 280 m<sup>2</sup> de TFA que té la casa fa un total de 10.637,75 kWh. A un preu de 0,13 €/kWh estimat constant alhora de fer el càlcul, s'obté que el preu que es paga per l'electricitat consumida en un any és de 1.382,91€. El cost total també inclou un impost sobre l'electricitat del 5,11% que encareix la factura en 90,10€ i el lloguer dels equips a 0,0267 € diaris, és a dir, 9,75€ anuals. Tots aquests costos sumen un total de 1.863,16€ que per a un IVA del 21% fan que la factura tingui un cost total de 2.254,42€.

El consum de calor de la casa calculat anteriorment;  $q_{sys}=136,56 \text{ kWh/m}^2$  anuals, que per als 280 m<sup>2</sup> de TFA de la casa fa un total de 38.236,46 kWh. Està cobert pel gas propà, que per a un cost estimat de 0,11 €/kWh [33] en la seva compra a granel resulta en un cost anual de 4.206,01€. Considerant un IVA del 21%, el cost de cobrir les necessitats de calor de la casa ascendeix a 5.089,27€.

A la vista d'aquests càlculs, el cost anual de cobrir les necessitats energètiques de la casa en l'escenari previ a la implantació del sistema és de 7.343,69€.

### Costos d'inversió

Els costos d'inversió consisteixen en la quantitat total de diners que cal invertir per tal de poder dissenyar i construir el sistema. Aquests costos van des del preu de tots els elements que calgui comprar fins al salari de l'enginyer que dissenyi el sistema.

Per determinar el cost dels elements del sistema s'han consultat les dades que proporcionen els fabricants de tots els models escollits anteriorment (els preus inclouen els impostos corresponents):

Producte	Preu unitari (€)	Nombre d'unitats	Cost (€)
Subsistema elèctric			
Panells fotovoltaics	247	10	2.470
Bateries	217	24	5.208
Controlador de càrrega solar	546	1	546
Unitat CHP	30.000	1	30.000
Inversors	2.450	3	7.350
Subsistema tèrmic			
Panells solars tèrmics	762,30	3	4.573,80
Caldera de suport	2.990	6	2.990
Refrigerador	12.705	1	12.705
Dipòsits			
Dipòsit de calor	828	1	828
Dipòsit de fred	480	1	480
TOTAL			67.150,80

Taula A: Costos d'inversió

Al resultat obtingut cal afegir-li el salari de l'enginyer que ha realitzat el projecte. Aquests costos s'han estimat en 6 €/h (IVA inclòs) com a salari d'un enginyer en pràctiques per a un total de 600 hores resultant en 3.600 €.

El cost d'inversió inicial és de 70.750,80 €.

El cost de la inversió no contempla els costos del circuit hidràulic ja que és possible reaprofitar elements ja instal·lats a l'habitatge i per la connexió de nous elements cal tenir en compte la morfologia de la casa i els requeriments que sorgeixin durant la instal·lació. Per tant, i per evitar inexactituds, no s'han tingut en compte.

Existeix la possibilitat de reduir la inversió inicial a través de subvencions. Aquests ajuts s'entreguen per part del govern espanyol o bé de la Generalitat de Catalunya i poden reduir significativament els costos de la instal·lació. Les subvencions poden venir donades per diferents motius ja siguin adjudicades per la millora en l'eficiència energètica de l'edifici, la instal·lació de panells fotovoltaics o de panells solars tèrmics o un pla renove de calderes entre altres. L'adjudicació de les subvencions està subjecte a les exigències de cada convocatòria, a uns pressupostos i a uns terminis determinats. Ja que la implementació del sistema no té una data fixada i el propietari podria ser adjudicatari d'una o varies subvencions o bé de ninguna, no té sentit incloure a hores d'ara aquests ajuts en l'estudi econòmic. Tot i així, és interessant tenir-les en compte alhora d'executar el projecte ja que poden arribar a augmentar la seva viabilitat econòmica de manera molt significativa.

### Costos d'operació

Aquests costos representen els diners que caldrà gastar per fer funcionar el sistema i venen donats principalment pel consum de combustible que tindrà el sistema.

Els preus s'han estimat a través de factures recents de Gas Natural Fenosa. La unitat CHP consumirà gas natural, al que se li ha estimat un preu constant alhora de fer el càlcul de 0,05 €/kWh. El consum anual de gas natural s'obté a partir de la quantitat d'electricitat i de calor que generarà la unitat multiplicades pels 280 m<sup>2</sup> de TFA:  $e_{cg} = 11.485,60$  kWh i  $q_{cg}=34.462,40$  kWh. Com aquests valors fan referència a l'energia útil, cal dividir-los entre l'eficiència global de la unitat (94%) per tal d'obtenir la quantitat d'energia real consumida:  $e_{cg} = 12.218,72$  kWh i  $q_{cg}=36.662,13$  kWh. El valor total obtingut és de 48.883,07 kWh. Aquesta quantitat d'energia suposarà un cost de 2.444,15€ a la factura del gas natural que s'obté per part de la companyia. També cal tenir en compte el terme fix que a 0,13€ diaris representarà un cost de 47,45€, l'impost sobre els hidrocarburs que a 0,0023 €/kWh representarà un cost de 112,43€ i el lloguer del comptador que amb un preu de 0,02€ diaris suposarà el pagament de 7,30€ anuals. Tots els components de la factura sumen un cost de 2.611,33€ per tant, al afegir el pagament de l'IVA, el cost total de la factura serà de 3.159,71€ anuals.

Pel que fa a la caldera de suport, el preu de la quantitat de pelets que caldrà cremar en ella per generar l'energia necessària recollida a la taula 7.26 multiplicada pels 280 m<sup>2</sup> de TFA:  $q_{ad}= 3.015,60$  kWh. Novament, ja que la caldera no és ideal i el valor de la taula fa referència a l'energia útil que proporcionarà la caldera, dividint aquest valor entre el rendiment de la caldera (89,75%) s'obté un total de 3.361,28 kWh consumits. El preu de comprar els pelets a granel estimat segons els preus dels últims anys és de 0,03€/kWh [34]. El cost anual del combustible necessari serà per tant de 106,22€ que per a un IVA del 21% resulta en 128,52€.

Així doncs, els costos d'operació del sistema seran de 3.288,24€ anuals.

### Costos de manteniment

S'han estimat uns costos de manteniment de la unitat CHP de 2,45 €/kW [Taula 3.2] a realitzar cada 5.000 hores de funcionament. Ja que el temps d'operació diari de la unitat s'havia determinat de 5 hores, s'estima realitzar el manteniment cada 3 anys aproximadament. Així doncs, s'ha estimat un cost de manteniment de 85,75€ cada 3 anys per a la unitat instal·lada (35 kW en total).

### Temps de retorn de la inversió (Pay-back)

El càlcul d'aquest indicador permet determinar el moment en el qual la inversió realitzada començarà a donar beneficis. Per tal de calcular el temps de retorn en anys primer cal determinar l'estalvi anual que és la diferència entre els costos de cobrir les necessitats energètiques de l'habitatge abans de la implantació del sistema i els costos d'operació del sistema:  $\text{Estalvi} = 7.343,69 - 3.288,24 = 4.055,46$  €/any.



Els costos de manteniment s'han estimat anteriorment com a 85,75€ cada 3 anys, per tant, ja que les demés quantitats estan expressades en períodes anuals, es poden expressar com a 28,58 €/any.

El temps de retorn serà:

$$TR = \frac{\text{Inversió inicial}}{\text{Estalvi} - \text{Costos de manteniment}} = 17,82 \text{ anys}$$

S'obté un temps de retorn de poc menys de 17 anys i 9 mesos.

### Valor actual net (VAN)

El valor actual net és un mètode que permet realitzar una valoració financera dels fluxos de caixa nets d'una inversió, és a dir, la relació entre ingressos i despeses d'una inversió en funció del temps.

$$VAN = \sum_{t=0}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t}$$

On:

FC són els fluxos de caixa: diferència entre l'estalvi anual i els costos de manteniment anual en €

i és la taxa de rendibilitat desitjada per a la inversió

El VAN indicarà que la inversió és aconsellable si pren un valor positiu i es calcula al final de la vida útil que s'ha estimat per al sistema. Ja que l'element més important del sistema és la unitat de cogeneració, amb una vida útil de 25 anys estimada pel fabricant [19], la vida útil del sistema s'ha considerat igual. La taxa de rendibilitat escollida utilitzada és un 5% ja que és la mínima aconsellada.

S'ha obtingut un valor de -12.946,11€ per al temps de vida útil estimat, per tant, aquest mètode desaconsella la inversió per a la taxa de rendibilitat escollida. Tot i el resultat obtingut, el sistema continua sent viable econòmicament, ja que el temps de retorn de la inversió és inferior a la vida útil del sistema però no retornarà els interessos esperats alhora de calcular el VAN.

Aquest estudi econòmic s'ha realitzat a Barcelona, a 5 de juny de 2018 segons les dades de mercat dels productes i serveis citats i se li estima una validesa de 6 mesos.

## Conclusions

En aquest projecte s'ha dissenyat un sistema de microtrigeneració basat en un motor Stirling com a impulsor de la unitat de cogeneració i en energia fotovoltaica i solar tèrmica per una vivenda unifamiliar i s'ha analitzat la seva viabilitat econòmica i mediambiental.

La microtrigeneració és una tecnologia poc utilitzada en l'àmbit residencial, per tant, no es disposa de grans quantitats d'informació al respecte ni de molta oferta en els equips necessaris per implementar-la. Ha estat difícil trobar alguns equips i les seves característiques, especialment la unitat de cogeneració degut al limitat nombre de fabricants. El preu d'aquestes unitats no es pot trobar a través d'Internet però afortunadament, s'ha accedit al preu del model escollit a través del contacte per correu electrònic amb un distribuïdor de la marca a la República Txeca.

El sistema s'ha dissenyat d'acord a les necessitats local d'una casa en particular que poden variar en un escenari futur, per tant és necessària la seva constant evolució. Durant el procés de disseny ha estat necessari anar modificant el sistema a mesura que s'anava desenvolupant ja que en un inici cal estimar diversos factors i, a mesura que es va evolucionant en l'etapa de disseny s'obtenen resultats que retroalimenten al propi sistema. Per aquest motiu s'ha requerit de varies iteracions per tant d'anar guanyant precisió i millorant l'eficiència i el sistema està sempre en una continua evolució.

El principal avantatge de la cogeneració és la seva alta eficiència, tal i com s'ha demostrat en el cas d'aplicació a través dels diferents indicadors. Per tal de maximitzar el seu valor, durant el disseny del sistema s'ha estudiat la viabilitat de millorar-la a través d'una reducció en la superfície de captació solar tèrmica que permetia una reducció en l'excés d'energia tèrmica generada. Aquest mètode ha resultat ser efectiu però a costa de reduir l'aportament d'energia de fonts renovables al sistema i d'incrementar el consum de combustible, per tant, s'ha arribat a la conclusió de que val la pena sacrificar aquesta millora energètica per tal de fer guanyar protagonisme a les energies renovables en el sistema, reduir les emissions i estalviar diners.

En un principi, s'ha dissenyat el sistema sense contemplar el consum propi que tenen els seus aparells però aquesta imprecisió s'ha arreglat iterant i ha estat possible gràcies al sobredimensionament que s'havia aplicat en l'elecció dels equips. Al incloure els consums s'ha conclòs que sistema veia reduïda la seva eficiència però era necessari fer que s'ajusti el màxim possible a la realitat.

L'estudi econòmic indica que és viable implementar el sistema tot i que no és una inversió rentable a curt termini degut als seus elevats costos d'implantació. El període de retorn de la inversió s'ha estimat entorn 17 i 18 anys mentre que la vida útil de la unitat de cogeneració escollida, que és l'element central del sistema és de 25 anys. Tot i així, el sistema continua sent rentable econòmicament i passats aquests 25 anys es pot comprar una altra unitat de cogeneració i, reaprofitant els elements del sistema que sigui possible continuar obtenint beneficis. A més a més, la decisió d'implantar el sistema també es pot prendre tenint en compte que la casa serà independent de la xarxa elèctrica i que tindrà un impacte mediambiental inferior, no solament tenint en compte els criteris econòmics. En un futur, seria desitjable que la tecnologia de

trigeneració evolucioni per tal de reduir costos i augmentar els beneficis però, a dia d'avui, l'única eina disponible per escurçar el període de retorn de la inversió és el finançament a través de subvencions.

A nivell personal, la realització d'aquest treball m'ha permès ampliar molt el meu coneixement sobre les tecnologies de generació combinada de calor, fred i electricitat i m'ha aportat una gran experiència sobre el que és realitzar un projecte d'enginyeria.

A mode de resum, la trigeneració en l'àmbit residencial és una tecnologia que comporta grans avantatges, sobretot en l'àmbit de l'eficiència energètica i pot arribar a ser viable econòmicament però es basa en una tecnologia que encara cal millorar.



## Bibliografia

- [1] "Tecnologías Para Microtrigeneración Distribuida." 2018. Consultat el 5 de juny.  
<http://www.sc.ehu.es/sbweb/energias-renovables/temas/trigeneracion/trigeneracion.html>.
- [2] "Micro-Cogeneración En Viviendas Para Generar Agua Caliente y Electricidad Para Autoconsumo." 2018. Consultat el 5 de juny.  
<https://www.certificadosenergeticos.com/micro-cogeneracion-viviendas-generar-agua-caliente-electricidad>.
- [3] Fraile, Diego. 2008. "Cogeneración: Aspectos Tecnológicos." *Master En Energías Renovables y Mercado Energético - Escuela de Organización Industrial*, 129.  
[http://api.eoi.es/api\\_v1\\_dev.php/fedora/asset/eoi:45276/componente45275.pdf](http://api.eoi.es/api_v1_dev.php/fedora/asset/eoi:45276/componente45275.pdf).
- [4] Badea, George Vlad. 2015. "Microgeneration Outlook." In , 1–31. doi:10.1007/978-1-4471-6254-4\_1.
- [5] "Welcometo PVCDROM | PVEducation." 2018. Consultat el 5 de juny.  
<http://www.pveducation.org/pvcdrom>.
- [6] "Adsorption Chiller | Britannica.Com." 2018. Consultat el 5 de juny.  
<https://www.britannica.com/topic/adsorption-chiller>.
- [7] "Opción 1. Motor Stirling." 2018. Consultat el 5 de juny.  
<http://www.empresaeficiente.com/wp-content/uploads/2016/01/la-microgeneracion.pdf>.
- [8] "EcoConsulting (UK) Ltd." 2018. Consultat el 5 de juny. <http://ecoconsulting.net/www/>.
- [9] "JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) - European Commission." 2018. Consultat el 5 de juny. [http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/tools.html](http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html).
- [10] Spinoni, J., J. Vogt, and P. Barbosa. 2015. "European Degree-Day Climatologies and Trends for the Period 1951-2011." *International Journal of Climatology* 35 (1): 25–36. doi:10.1002/joc.3959.
- [11] "I Have a 12V 20AH Battery and It's Showing 12.7V. How Much of It Is Charged? - Quora." 2018. Consultat el 5 de juny. <https://www.quora.com/I-have-a-12V-20AH-battery-and-its-showing-12-7V-How-much-of-it-is-charged>.
- [12] "ATLAS DE RADIACIÓ SOLAR A CATALUNYA." 2000.  
[http://icaen.gencat.cat/web/.content/10\\_ICAEN/12\\_serveis/06\\_estrategia/enllacos\\_planificacioEnergetica/monografic12.pdf](http://icaen.gencat.cat/web/.content/10_ICAEN/12_serveis/06_estrategia/enllacos_planificacioEnergetica/monografic12.pdf).
- [13] Avda, and Diagonal. 2018. "Els Graus-Dia de Calefacció i Refrigeració de Catalunya Resultats a Nivell Municipal." Consultat el 5 de juny. [www.icaen.es](http://www.icaen.es).

- [14] Jícha, Miroslav., and Vysoké učení technické v Brně. Fakultastrojníhoinženýrství. 2001. *PřenosTepla a Látky*. CERM.
- [15] Škorpík, Jiří., and Vysoké učení technické v Brně. Energetický ústav. 2008. *Příspěvek k NávrhuStirlingovaMotoru = A Contribution to Design of the Stirling Engine :Zkrácená Verze Ph. D. Thesis*. [Vysoké učení technické].
- [16] “Jinko Solar - JKM-200M-72 | Solar Panel 200W Mono | OFF 11702.” 2018. Consultat el 5 de juny. <https://www.solartraders.com/en/marketplace/offers/jinko-solar-jkm-200m-72-solarmodul-pv-handel-10702>.
- [17] “Batería Solar 12v 250ah.” 2018. Consultat el 5 de juny. <http://supermercadosolar.es/802-batería-solar-monoblock-12v250ah-c100-solar-luxe-.html>.
- [18] “Conext XW MPPT 60 Amp Solar Charge Controller.” 2018. Consultat el 5 de juny. <https://www.solar-electric.com/xaxwmp60amps.html>.
- [19] “MikrokogeneračníJednotkaCleanergy C9G | Www.Stirlingenergy.Cz.” 2018. Consultat el 5 de juny. <http://www.stirlingenergy.cz/obsah/mikrokogeneracni-jednotka-cleanergy-c9g>.
- [20] “Cleanergy: C9G Stirling-BHKW | BHKW-Prinz.De.” 2018. Consultat el 5 de juny. <http://www.bhkw-prinz.de/cleanergy-c9g-stirling-bhkw/2384>.
- [21] “XTM 4000-48 - Studer Innotec.” 2018. Consultat el 5 de juny. <http://www.studer-innotec.com/es/productos/gama-xtender/xtm-4000-48-298>.
- [22] Escoda, Salvador SA. 2017. “Tarifa de Precios - Energías Renovables.” [http://www.salvadorescoda.com/tarifas/Energias\\_Renovables\\_tarifa\\_PVP\\_SalvadorEscoda.pdf](http://www.salvadorescoda.com/tarifas/Energias_Renovables_tarifa_PVP_SalvadorEscoda.pdf)
- [23] “HovalAktiengesellschaft.” 2018. MASSIVE ART WebServices GmbH. Consultat el 5 de juny. <http://www.hoval.co.uk/products/biolyt-wood-pellet-boiler/biolyt-50-70>.
- [24] “WarmteGedrevenAdsorptie En AbsorptieKoelsystemen van SuproCooling. De 5 KW Adsorptie Chiller MetEenGe-luml;NtegreerdeDry-Cooler- EenvoudigelInstallatie En GenoegKoelvermogenVoorEenVrijstaandeWoning- De SolabChiller Kan in de TuinoOfOpEenDakWordenGeplaatst- De Chiller Kan EenvoudigWordenGe-luml;NstalleerdOpHetWarm- En KoudWaterCircuit- TechnischeSpecificaties- Koelvermogen- 3-5 KWAandrijfttemperatuur- 60 -Ndash; 95 - Deg;CKoudWaterTemperatuur-.” 2018. Consultat el 5 de juny. <http://www.supro-cooling.nl/nl/Solabcool-Chiller-5-kW->.
- [25] “LM 500 2V - 500l Buffer Tank.” 2018. Consultat el 5 de juny. <https://buffer-tank.co.uk/lm-0500-2v.php>.

- [26] “Storage Tank 1900 I, Pressurized - OÜ CerbosKüttesüsteemid.” 2018. Consultat el 5 de juny. <https://www.cerbos.ee/en/storage-tanks/99-storage-tank-1900-i-pressurized.html>.
- [27] “CTE Código Técnico de La Edificación Partes I y II.” 2006. [https://previa.uclm.es/area/ing\\_rural/Normativa/CTE-2006/CTE\\_COMPLETO.pdf](https://previa.uclm.es/area/ing_rural/Normativa/CTE-2006/CTE_COMPLETO.pdf).
- [28] “Rite - Reglamento Instalaciones Térmicas En Los Edificios - Energía y Desarrollo Sostenible - Energía - M<sup>o</sup> de Energía, Turismo y Agenda Digital.” 2018. Consultat el 5 de juny. <http://www.minetad.gob.es/energia/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/Paginas/InstalacionesTermicas.aspx>.
- [29] “Sección HE 4 Contribución Solar Mínima de Agua Caliente Sanitaria 1 Generalidades.” 2018. Consultat el 5 de juny. <https://www.terra.org/data/cteseccionhe4.pdf>.
- [30] “Baltarga - Google Maps.” 2018. Consultat el 5 de juny. <https://www.google.sk/maps/place/25721+Baltarga,+Lérida/@42.3634016,1.8056791,18z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0x12a59d3c3cbd58b9:0x1e1394c15b85d6c4!8m2!3d42.3633538!4d1.807154>.
- [31] “Consumos Del Sector Residencial En España Resumen de Información Básica.” 2018. Consultat el 5 de juny. [http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos Documentacion Basica Residencial Unido\\_c93da537.pdf](http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos Documentacion Basica Residencial Unido_c93da537.pdf).
- [32] “Caldera de Biomasa GG20K.” 2018. Consultat el 5 de juny. <http://grupobiosan.com/calderas-de-biomasa/calderas-de-pellets/calderas-de-pellets-gama-domestica-16-35/caldera-de-biomasa-policombustible-gg20k.html>.
- [33] “Precio Gas Propano.” 2018. Consultat el 5 de juny. <https://preciogas.com/propano/precio>.
- [34] Precios, €. 2015. “INFORME DE PRECIOS DE LA BIOMASA PARA USOS TÉRMICOS Datos Correspondientes Al 4 o Trimestre de 2017,” no. 169: 16762–166. [http://www.idae.es/sites/default/files/estudios\\_informes\\_y\\_estadisticas/informe\\_precios\\_biomasa\\_usos\\_termicos\\_4t\\_2017\\_3.pdf](http://www.idae.es/sites/default/files/estudios_informes_y_estadisticas/informe_precios_biomasa_usos_termicos_4t_2017_3.pdf).

